

基于可拓理论及组合权重赋值的铁路隧道衬砌结构分级评价方法研究

王君楼¹, 喻春焱², 万军利³, 张院生⁴

(1. 京昆高速铁路西昆有限公司, 重庆 400023; 2. 上海天佑工程咨询有限公司, 上海 200092; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081; 4. 铁科院(深圳)研究设计院有限公司, 广东 深圳 518063)

摘要: 为了对铁路隧道衬砌结构病害进行综合分析, 以便科学地评价衬砌结构健康状况, 根据铁路隧道衬砌结构评价体系形成的原则, 建立了基于可拓理论和组合权重取值方法的铁路隧道衬砌结构状态分级评价体系, 细化了分级评价方法的计算流程, 在权重取值过程中, 采用熵权法和专家意见法相结合, 提出一种考虑不同评价等级变化的组合权重赋值方法。以金温货线中湖边一号隧道、小寺一号隧道和魁市隧道衬砌结构状态进行评价, 结果表明, 三处隧道衬砌结构综合等级特征值分别为 3.918、2.544、2.535, 评价结果与隧道实际情况较为吻合, 表明该方法的可靠性和有效性。

关键词: 铁路隧道; 分级评价; 可拓理论; 组合权重赋值; 衬砌结构

中图分类号: U457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)06-0264-08

隧道具有改善铁路路线方向、缩短铁路铺设里程、提高铁路运营效率等重要作用, 是铁路建设关键组成部分。我国铁路隧道建设日益增多, 呈现不同程度的病害特征, 如衬砌结构劣化、衬砌背后空洞或不密实、衬砌结构渗漏水等, 尤其是早期建设的普速铁路隧道, 因建设时间久远、施工过程粗糙及地质环境复杂等因素, 均出现较为严重的病害现象, 危及线路安全运营。目前我国对隧道灾害风险管理的研究尚未成熟, 对衬砌结构状态评价研究不多。罗建春和高菊如^[1]采用幂指数法建立既有线路隧道病害分级方法与评价体系, 通过案例证明该方法的科学性。王志伟等^[2]通过层次分析法及物元理论获取权重计算方法, 并根据模糊综合评价理论, 提出高速铁路隧道状态三级模糊综合评价方法。赵博健等^[3]以宜万铁路隧道为例, 采用模糊评价模型, 建立了一种基于层次分析理论的铁路隧道病害量化评价体系。李俊松等^[4]应用 ANP 与模糊综合评价方法对铁路隧道岩溶风险进行有效评价, 建立了铁路隧道岩溶风险的评价指标体系。丁浩等^[5]根据现有渗漏水分级标准及研究成果, 通过分析渗漏水的病害成因及影响对象与后果, 提出隧道渗漏水病害分级方法的改进与优化方向。

本文采用可拓理论方法, 建立铁路隧道衬砌结构分级评价体系, 根据现场隧道检测资料, 归纳总结衬砌结构影响因子, 提出基于可拓理论及组合权重赋值的分级评价方法。

1 铁路隧道衬砌结构评价因子指标

铁路运营隧道衬砌结构状态影响因子较多, 依据评价过程的可操作性、科学性、简洁性等原则, 结合《铁路运营隧道衬砌安全等级评定暂行规定》及《铁路隧道设备劣化评定标准——隧道》规定要求, 铁路隧道主要存在渗漏水、冻害、衬砌裂缝及衬砌不密实 4 个病害, 针对普速或早期修建的铁路尤其明显, 因此根据隧道衬砌结构主要的病害, 建立三级评价因子体系, 各因子集如表 1 所示。

2 铁路隧道衬砌结构可拓分级评价方法

2.1 衬砌结构可拓分级评判流程

可拓理论是一种形式化、逻辑化及数学化的工具, 通过较少的信息, 去解决复杂的问题, 并从定量和定性两个角度, 采用形式化模型研究事物拓展可能性的规律与方法。自 1983 年提出以来, 在各领域得到广泛应用, 涵盖经济、工业、军事、医学等多个层面。近年来, 可拓理论才逐渐应用到铁路工务技术应用领域, 其中在隧道衬砌评价方面获得了长足

收稿日期: 2023-12-20

基金项目: 浙江金温铁道开发有限公司科技项目(金温它[2021]合-A-140); 中国铁道科学研究院集团有限公司基金(2021YJ178)

作者简介: 王君楼(1980—), 男, 四川阆中人, 博士, 高级工程师, 研究方向为地质灾害治理技术; 通信作者张院生(1989—), 男, 江西九江人, 博士, 副研究员, 研究方向为地灾防治技术。

表 1 铁路隧道衬砌结构评价打分标准

一级分类因子	二级分类因子	评价指标分级标准				
		完好(D)	轻微(C)	较严重(B)	严重(A)	极严重(AA)
水的影响程度(U_1)	涌水量及流速(U_{11})	0~0.5	0.5~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0
	渗漏水位置(U_{12})	0~0.4	0.4~1.2	1.2~3.0	3.0~5.0	5.0~10.0
	围岩节理发育情况(U_{13})	0~0.5	0.5~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0
	水源补给形式(U_{14})	0~1.0	1.0~3.0	3.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0
	季节性冻融圈范围(U_{15})	0~0.5	0.5~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0
	温度及温差影响(U_{16})	0~0.5	0.5~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0
衬砌结构(U_2)	裂缝长度(U_{21})	0~0.5	0.5~2.0	2.0~5.0	5.0~10.0	10.0~20.0
	裂缝宽度(U_{22})	0~0.4	0.4~1.2	1.2~3.0	3.0~5.0	5.0~10.0
	衬砌背后空洞(U_{23})	0~0.2	0.2~1.0	1.0~3.0	3.0~5.0	5.0~10.0
	回填不密实(U_{24})	0~0.5	0.5~3.0	3.0~9.0	9.0~15.0	15.0~30.0

的发展,得到了较为深入的研究和应用。

衬砌结构状态评价可拓分级评判流程如图 1 所示,首先通过现场调查,确定该隧道衬砌结构因子评价指标,即按照衬砌状态等级划分的一级、二级因子集,一级因子为水的影响程度、衬砌结构,二级因子为涌水量及流速、渗漏水位置、水源补给形式、裂缝长度、裂缝宽度等,其次采用可拓理论评价二级因子,获取一级因子的等级变量特征值,该特征值反映了二级因子对一级因子的影响程度,最后综合各一级因子对隧道衬砌做出整体评价,确定隧道衬砌结构综合等级特征值,即隧道衬砌结构安全状态程度。

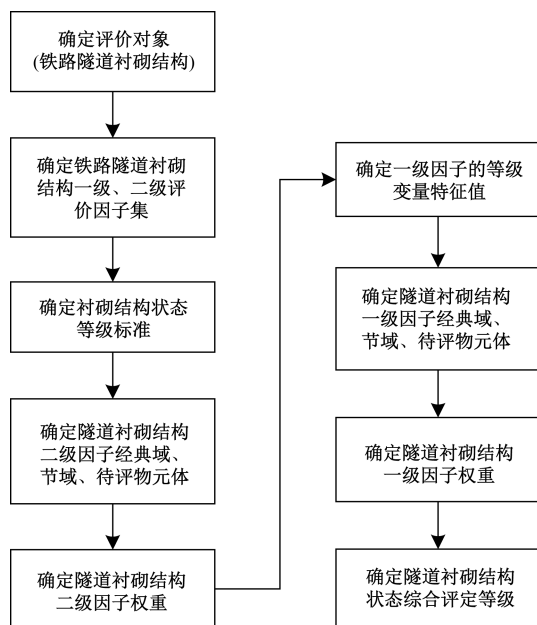


图 1 衬砌结构状态可拓分级评价流程

2.2 隧道衬砌结构可拓分级评价具体步骤

第一步:将各指标量纲规格化。

为了不影响评价各因子指标,采用极差化对指标量纲进行规格化处理,如下所示:

$$\bar{X}_{jt} = \begin{cases} \frac{X_{jt} - X_{jt}^{\min}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}}, & \text{对于要求越大越好的指标} \\ \frac{X_j^{\max} - X_{jt}}{X_j^{\max} - X_j^{\min}}, & \text{对于要求越小越好的指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\bar{X}_{jt}$ 为量纲规格化后的指标值; X_{jt} 为评价前的指标值; $X_j^{\max}$ 为第 j 个指标的评价最大值; $X_j^{\min}$ 为第 j 个指标的评价最小值。

第二步:确定二级因子可拓经典域。

$$R_t^{(k)} = (N_t, C_j^{(k)}, X_{jt}^{(k)}) = \begin{bmatrix} N_t & C_1^{(k)} & X_{1t}^{(k)} \\ & C_2^{(k)} & X_{2t}^{(k)} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n^{(k)} & X_{nt}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_t & C_1^{(k)} & \langle a_{1t}^{(k)}, b_{1t}^{(k)} \rangle \\ & C_2^{(k)} & \langle a_{2t}^{(k)}, b_{2t}^{(k)} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n^{(k)} & \langle a_{nt}^{(k)}, b_{nt}^{(k)} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $R_t^{(k)}$ 为物元; i 为二级因子评价的数量, $k = 1, 2, \dots, i$; N_t 为衬砌结构评价级别, $t = 1, 2, \dots, m$; $C_n^{(k)}$ 为第 k 个二级因子的第 n 个评价指标; $X_{nt}^{(k)}$ 为对应第 k 个二级因子的第 n 个评价指标范围,即经典域,且 $X_{jt}^{(k)} = \langle a_{jt}^{(k)}, b_{jt}^{(k)} \rangle, j = 1, 2, \dots, n$ 。

第三步:确定铁路隧道二级因子可拓节域和待评物元节域。可表示为

$$R_p^{(k)} = (P^{(k)}, C_j^{(k)}, X_{jp}^{(k)}) = \begin{bmatrix} P^{(k)} & C_1^{(k)} & X_{1p}^{(k)} \\ & C_2^{(k)} & X_{2p}^{(k)} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n^{(k)} & X_{np}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{(k)} & C_1^{(k)} & \langle a_{1p}^{(k)}, b_{1p}^{(k)} \rangle \\ & C_2^{(k)} & \langle a_{2p}^{(k)}, b_{2p}^{(k)} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n^{(k)} & \langle a_{np}^{(k)}, b_{np}^{(k)} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $R_p^{(k)}$ 为二级因子可拓节域; $P^{(k)}$ 为衬砌结构评价类别全体; $X_{np}^{(k)}$ 为第 k 个二级因子下第 n 个全体评价指标范围, $a_{np}^{(k)}$ 、 $b_{np}^{(k)}$ 分别为对应评价指标的下、上最值。

待评物元是所要评价的对象,即二级因子,把收集到的数据用物元来表示为

$$R^{(k)} = (p^{(k)}, C_j^{(k)}, x_j^{(k)}) = \begin{bmatrix} p^{(k)} & C_1^{(k)} & x_1^{(k)} \\ & C_2^{(k)} & x_2^{(k)} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n^{(k)} & x_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $p^{(k)}$ 为二级因子待评事物; $x_j^{(k)}$ 为二级因子待评事物的量值。

第四步:确定二级因子待评物元关于各等级的关联度。

各待评对象的单项指标 $x_j^{(k)}$ 关于各等级 t 的关联函数为

$$K_t''(x_j) = \begin{cases} \frac{-\rho''(x_j^{(k)}, X_{jt}^{(k)})}{|X_{jt}^{(k)}|}, & x_j^{(k)} \in X_{jt}^{(k)} \\ \frac{\rho''(x_j^{(k)}, X_{jt}^{(k)})}{\rho''(x_j^{(k)}, X_{jp}^{(k)}) - \rho''(x_j^{(k)}, X_{jt}^{(k)})}, & x_j^{(k)} \notin X_{jt}^{(k)} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中: } \rho''(x_j^{(k)}, X_{jt}^{(k)}) = \left| x_j^{(k)} - \frac{a_{jt}^{(k)} + b_{jt}^{(k)}}{2} \right| - \frac{b_{jt}^{(k)} - a_{jt}^{(k)}}{2}, \rho''(x_j^{(k)}, X_{jp}^{(k)}) = \left| x_j^{(k)} - \frac{a_{jp}^{(k)} + b_{jp}^{(k)}}{2} \right| - \frac{b_{jp}^{(k)} - a_{jp}^{(k)}}{2}, |X_{jt}^{(k)}| = |b_{jt}^{(k)} - a_{jt}^{(k)}|。$$

待评对象 p 关于等级 t 的关联度为

$$K_t''(p) = \sum_{j=1}^n W_j''(k) K_t''(x_j^{(k)}) \quad (6)$$

式中: $K_t''(p)$ 为第 k 个一级因子下待评对象 p 关于等级 t 的关联度; $W_j''(k)$ 为二级组合变权指标系数,且有 $\sum_{j=1}^n W_j''(k) = 1$ 。

第五步:确定一级因子等级变量特征值。

若 $K_t''(p) = \max_{t \in \{1, 2, \dots, m\}} K_t''(p)$, 则评定 p 属于等级 t 。令

$$\begin{cases} \bar{K}_t''(p) = \frac{K_t''(p) - \min_{t \in \{1, 2, \dots, m\}} K_t''(p)}{\max_{t \in \{1, 2, \dots, m\}} K_t''(p) - \min_{t \in \{1, 2, \dots, m\}} K_t''(p)} \\ j^{''(k)*} = \frac{\sum_{t=1}^m t \bar{K}_t''(p)}{\sum_{t=1}^m \bar{K}_t''(p)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $j^{''(k)*}$ 为一级因子等级变量特征值,反映一级类别因子对衬砌结构状态等级程度,即偏向临近等级的程度。

第六步:确定衬砌结构一级因子经典域、可拓节域、待评物元。

一级因子的可拓节域为

$$R'_t = (N_t, C'_k, X'_{kt}) = \begin{bmatrix} N_t & C'_1 & X'_{1t} \\ & C'_2 & X'_{2t} \\ & \vdots & \vdots \\ & C'_i & X'_{it} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R'_p = (P', C'_k, X'_{kp}) = \begin{bmatrix} P' & C'_1 & X'_{1p} \\ & C'_2 & X'_{2p} \\ & \vdots & \vdots \\ & C'_p & X'_{ip} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P' & C'_1 & \langle a'_{1p}, b'_{1p} \rangle \\ & C'_2 & \langle a'_{2p}, b'_{2p} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C'_i & \langle a'_{ip}, b'_{ip} \rangle \end{bmatrix} \quad (9)$$

一级因子的待评物元为

$$R' = (p', C'_k, x'_k) = \begin{bmatrix} p' & C'_1 & j^{''(1)*} \\ & C'_2 & j^{''(2)*} \\ & \vdots & \vdots \\ & C'_i & j^{''(i)*} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: R'_t 为一级因子的经典域; R'_p 为一级因子的节域; R' 为一级因子的待评物元; P' 为一级因子等级类别全体; p' 为一级因子的待评事物; X'_{kt} 为一级因子经典域指标范围; X'_{kp} 为一级因子等级类别评价指标范围; C'_k 为一级因子集; a'_{kp} 、 b'_{kp} 分别为一级因子的评价指标下、上最值。

第七步:确定一级因子待评物元关于各等级的关联度。

各待评对象的单项指标 x'_k 关于各等级 t 的关联函数为

$$K'_t(x_k) = \begin{cases} \frac{-\rho'(x'_k, X'_{kt})}{|X'_{kt}|}, & x'_k \in X'_{kt} \\ \frac{\rho'(x'_k, X'_{kt})}{\rho'(x'_k, X'_{kp}) - \rho'(x'_k, X'_{kt})}, & x'_k \notin X'_{kt} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{其中, } \rho'(x'_k, X'_{kt}) = \left| x'_k - \frac{a'_{kt} + b'_{kt}}{2} \right| - \frac{b'_{kt} - a'_{kt}}{2}, |X'_{kt}| = |b'_{kt} - a'_{kt}|, \rho'(x'_k, X'_{kp}) = \left| x'_k - \frac{a'_{kp} + b'_{kp}}{2} \right| - \frac{b'_{kp} - a'_{kp}}{2}。$$

待评对象 p (一级因子)关于等级 t 的综合关联度为

$$K'_t(p) = \sum_{k=1}^i W'_k K'(x'_k) \quad (12)$$

式中: $K'_t(p)$ 为待评对象 p (一级因子) 关于等级 t 的综合关联度; W'_k 为一级权重指标系数, 且有 $\sum_{k=1}^i W'_k = 1$ 。

第八步: 确定隧道衬砌结构综合等级特征值。

令 $K' \max(p) = \max_{k \in \{1, 2, \dots, i\}} K'(p)$, 则有

$$\begin{cases} K'(p) = \frac{K'(p) - \min_{k \in \{1, 2, \dots, i\}} K'(p)}{\max_{k \in \{1, 2, \dots, i\}} K'(p) - \min_{k \in \{1, 2, \dots, i\}} K'(p)} \\ j'^* = \frac{\sum_{k=1}^i t K'(p)}{\sum_{k=1}^i K'(p)} \end{cases} \quad (13)$$

式中: j'^* 为隧道衬砌结构在各类因子影响下的等级特征值, 反映隧道衬砌结构状态等级程度。

以上为获取铁路隧道衬砌结构综合等级特征值, 评价衬砌结构状态的具体步骤。

3 基于熵权法和专家意见法的权重取值研究

隧道衬砌结构因子权重取值是评价状态结果的关键因素, 不同的隧道案例中, 相同的评价因子, 权重取值结果可能不一样, 在地下水较丰富的隧道, 水因素可能是衬砌结构破坏的关键因素, 权重赋值较高, 反之, 衬砌结构因素占状态评价的主导作用, 相应的权重赋值较高。因此, 多因子指标权重系数的获取是衬砌结构评价的关键内容, 直接影响评价判别结果。通过尝试采用多种单一的权重赋值方法, 如层次分析法^[6]、两两比较法^[7]、专家意见法^[8]、熵权法^[9-12]、变异系数法^[13]等, 比较结果各有自身的优越性。层次分析法、两两比较法及专家意见法属于主观赋权范畴, 它是基于决策者对指标因子的偏好或经验给出得分, 在多因子赋权时能强调或减弱某单因子的作用, 防止判别结果因个别因子赋权过高或过低而与真实背离情况, 但缺点是不能反映数据特点。熵权法、变异系数法属于客观赋权范畴, 如熵权法是根据各数据指标的变异程度, 利用信息熵计算各指标的熵权, 强调评价因子的客观性, 但缺点是忽视了决策者的知识和经验。采用专家意见法和熵权法相结合的赋权方法获取因子权重指标是较为可靠的方法, 能结合两者方法的优点, 克服两者缺点, 其步骤是先采用熵权法确定各级因子权系数, 再根据专家意见建立不同评价指标的变权系数, 最后综合两者指标权系数, 得到组合权重系数。计算步骤如下。

(1) 建立待评价事物和评价指标判断矩阵 R

$$R = (K_{jt}^*)_{nm} \quad (14)$$

式中: K_{jt}^* 为各级评价指标的关联函数; $j = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, m$ 。

(2) 参数指标量纲归一化处理, 得到判断矩阵。

$$\bar{K}_{jt} = \frac{K_{jt}^* - K_{\min}^*}{K_{\max}^* - K_{\min}^*} \quad (15)$$

式中: $\bar{K}_{jt}$ 为量纲归一化处理值; $K_{\min}^*$ 、 $K_{\max}^*$ 分别为评价指标的最小值和最大值。

(3) 确定评价指标的熵值。

$$\begin{cases} H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{t=1}^m f_{jt} (\ln f_{jt}) \\ f_{jt} = \frac{1 + K_{jt}^*}{\sum_{t=1}^m (1 + K_{jt}^*)} \end{cases} \quad (16)$$

式中: H_j 为各评价指标的熵; f_{jt} 为传统指标修正值。

(4) 计算各级评价指标熵权系数 $\hat{w}_j^{n(k)}$ 、 $\hat{w}'_k$ 。

$$\hat{w}_j^{n(k)} = \frac{1 - H_j^n}{n - \sum_{j=1}^n H_j^n} \quad (17)$$

式中: $\hat{w}_j^{n(k)}$ 、 $\hat{w}'_k$ 分别满足 $\sum_{j=1}^n \hat{w}_j^{n(k)} = 1$ 、 $\sum_{k=1}^i \hat{w}'_k = 1$; $\hat{w}_j^{n(k)}$ 为二级指标熵权系数; $\hat{w}'_k$ 为一级指标熵权系数; H_j^n 、 H'_j 分别为二级、一级因子指标熵值, 可由式 (16) 得到。

(5) 确定专家指标变权系数 $\hat{w}_{jt}^{n(k)}$ 、 $\hat{w}'_k$ 。

考虑专家意见的因子权值分配具有非常重要的意义, 根据专家意见建立不同评价等级的变权系数, 即某因子的权系数取值将衬砌结构等级考虑在内。例如, 水的影响程度中水涌出量及流速, 当地下水较为丰富时, 水涌出量较大, 说明衬砌结构状态病害较为严重, 其专家意见给出的权系数相应变大, 其他因子赋权系数应较小; 当无水涌出量及流速时, 其赋予的权值变小, 从而实现各级因子变权重取值。 $\hat{w}_{jt}^{n(k)}$ 为第 k 个二级因子的 j 行 t 列的专家权重; $\hat{w}'_k$ 为一级因子的第 t 列的专家权重。不同的隧道病害状况, 专家意见给出的因子评价分值不同, 例如案例中专家意见打分如表 2 所示。

(6) 获取组合变权指标权重。

$$\begin{cases} W_{(k)j} = \frac{\hat{w}_j^{n(k)} \hat{w}_{jt}^{n(k)}}{\hat{w}_{1t}^{n(k)} \sum_{j=1}^n \frac{\hat{w}_j^{n(k)} \hat{w}_{jt}^{n(k)}}{\hat{w}_{1t}^{n(k)}}} \\ W'_k = \frac{\hat{w}'_k \hat{w}'_k}{\hat{w}'_1 \sum_{k=1}^i \frac{\hat{w}'_k \hat{w}'_k}{\hat{w}'_1}} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $W_j^{n(k)}$ 、 W'_k 分别满足 $\sum_{j=1}^n W_j^{n(k)} = 1$ 、 $\sum_{k=1}^i W'_k = 1$ ； $W_j^{n(k)}$ 为二级组合变权指标权重； W'_k 为一级组合变权指标权重； $\hat{w}_{1t}^{n(k)}$ 、 $\hat{w}'_1$ 分别为二级、一级评价中第一个因子的专家权重。

4 工程应用

4.1 工程概况

金温货线是金华市至温州市的一条重要的客货共线铁路，正线延展长度为 235.9 km，隧道 96 座，共延长 38.2 km。沿线隧址区围岩等级以 III~V 级为主，岩层以砂砾岩、粉砂岩、流纹岩及凝灰岩为主。周边地下水埋深 5~20 m，以硫酸盐侵蚀为主，环境作用等级为 H₁~H₂。线路年平均气温为 15~18 ℃，降水集中于每年 5 月、6 月。目前本条线既有隧道存在较为严重的渗漏水病害，大部分的渗漏水病害表现为隧道拱部严重的渗漏痕迹；部分隧道边墙冻蚀掉块；部分隧道拱部存在结构腐蚀、风化、开裂及衬砌空洞现象。

湖边一号隧道、小寺一号隧道和魁市隧道是金温货线上的部分隧道，该隧道因修建时间较早，隧道内部渗漏水较为严重，衬砌结构也出现了不同程度的劣化、脱空及不密实等病害问题。各隧道局部现场情况如图 2 所示，根据现场调查，隧道因年老失修，主要病害有渗漏水、衬砌裂缝、衬砌脱

空等。根据各隧道病害实际情况，列出病害分值如表 2 所示。

4.2 应用分析

对铁路隧道衬砌结构状态评价时，首先需要根据现场实际情况，确定准确合理的因子指标参数，再根据本文分级评价流程，依次确定二级因子可拓经典域、节域、待评物元、二级因子权重、二级因子等级关联度、一级因子等级特征值、一级因子可拓经典域、节域、待评物元、一级因子权重、一级因子等级关联度，最后确定综合等级特征值。

以湖边一号隧道为例，由表 2 可确定二级因子

表 2 金温货线部分隧道病害分值及专家打分(9 分制)

一级分类因子	二级分类因子	金温货线部分隧道病害分值			专家意见打分
		湖边一号隧道	小寺一号隧道	魁市隧道	
水的影响程度(U ₁)	涌水量及流速(U ₁₁)	7.0	2.5	1.0	6
	渗漏水位置(U ₁₂)	4.0	1.5	1.5	5
	围岩节理发育情况(U ₁₃)	3.0	1.5	1.5	2
	水源补给形式(U ₁₄)	6.0	3.5	3.5	3
	季节性冻融圈范围(U ₁₅)	0.5	0.5	0.5	1
	温度及温差影响(U ₁₆)	1.5	1.5	1.5	2
衬砌结构(U ₂)	裂缝长度(U ₂₁)	5.5	2.5	1.0	5
	裂缝宽度(U ₂₂)	1.5	2.5	0.5	4
	衬砌背后空洞(U ₂₃)	4.5	1.5	1.5	4
	回填不密实(U ₂₄)	4.5	3.5	3.5	5

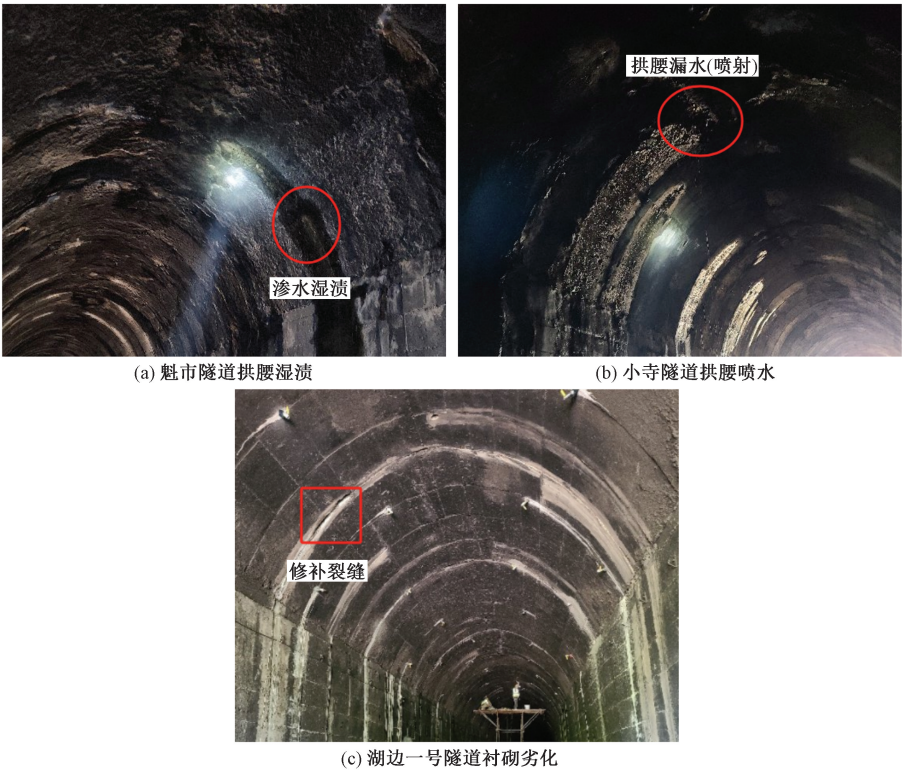


图 2 各隧道局部病害

的可拓经典域、节域及待评物元,各级因子权重分配表 3 所示,各级因子指标等级关联度如表 4 所示。

(1) 二级因子(水的影响程度 U_1 及衬砌结构 U_2)可拓经典域。

$$R_1^{(1)} = (N_1, C_j^{(1)}, X_{j1}^{(1)}) = \begin{bmatrix} N_1 & C_1 & \langle 0.000, 0.025 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.000, 0.040 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.000, 0.025 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.000, 0.050 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.000, 0.025 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.000, 0.025 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_2^{(1)} = (N_2, C_j^{(1)}, X_{j2}^{(1)}) = \begin{bmatrix} N_2 & C_1 & \langle 0.025, 0.100 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.040, 0.120 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.025, 0.100 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.050, 0.150 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.025, 0.100 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.025, 0.100 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_3^{(1)} = (N_3, C_j^{(1)}, X_{j3}^{(1)}) = \begin{bmatrix} N_3 & C_1 & \langle 0.100, 0.250 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.120, 0.300 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.100, 0.250 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.150, 0.250 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.100, 0.250 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.100, 0.250 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_4^{(1)} = (N_4, C_j^{(1)}, X_{j4}^{(1)}) = \begin{bmatrix} N_4 & C_1 & \langle 0.250, 0.500 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.300, 0.500 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.250, 0.500 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.250, 0.500 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.250, 0.500 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.250, 0.500 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_5^{(1)} = (N_5, C_j^{(1)}, X_{j5}^{(1)}) = \begin{bmatrix} N_5 & C_1 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_1^{(2)} = (N_1, C_j^{(2)}, X_{j1}^{(2)}) = \begin{bmatrix} N_1 & C_1 & \langle 0.000, 0.025 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.000, 0.040 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.000, 0.020 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.000, 0.017 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_2^{(2)} = (N_2, C_j^{(2)}, X_{j2}^{(2)}) = \begin{bmatrix} N_2 & C_1 & \langle 0.025, 0.100 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.040, 0.120 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.020, 0.100 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.017, 0.100 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_3^{(2)} = (N_3, C_j^{(2)}, X_{j3}^{(2)}) = \begin{bmatrix} N_3 & C_1 & \langle 0.100, 0.250 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.120, 0.300 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.100, 0.300 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.100, 0.300 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_4^{(2)} = (N_4, C_j^{(2)}, X_{j4}^{(2)}) = \begin{bmatrix} N_4 & C_1 & \langle 0.250, 0.500 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.300, 0.500 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.300, 0.500 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.300, 0.500 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_5^{(2)} = (N_5, C_j^{(2)}, X_{j5}^{(2)}) = \begin{bmatrix} N_5 & C_1 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.500, 1.000 \rangle \end{bmatrix}。$$

(2) 二级因子(水的影响程度 U_1 及衬砌结构 U_2)可拓节域。

$$R_p^{(1)} = (P^{(1)}, C_j^{(1)}, X_p^{(1)}) = \begin{bmatrix} P^{(1)} & C_1 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \\ & C_5 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \\ & C_6 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_p^{(2)} = (P^{(2)}, C_j^{(2)}, X_p^{(2)}) = \begin{bmatrix} P^{(2)} & C_1 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \\ & C_3 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \\ & C_4 & \langle 0.000, 1.000 \rangle \end{bmatrix}。$$

(3) 二级因子(水的影响程度 U_1 及衬砌结构 U_2)待评物元。

$$R^{(1)} = (p^{(1)}, C_j^{(1)}, x_j^{(1)}) = \begin{bmatrix} P^{(1)} & C_1 & 0.350 \\ & C_2 & 0.400 \\ & C_3 & 0.150 \\ & C_4 & 0.300 \\ & C_5 & 0.025 \\ & C_6 & 0.075 \end{bmatrix};$$

$$R^{(2)} = (p^{(2)}, C_j^{(2)}, x_j^{(2)}) = \begin{bmatrix} P^{(2)} & C_1 & 0.275 \\ & C_2 & 0.150 \\ & C_3 & 0.450 \\ & C_4 & 0.150 \end{bmatrix}。$$

(4) 一级因子可拓经典域。

$$R'_1 = (N_1, C'_k, X'_{k1}) = \begin{bmatrix} N_1 & C_1 & \langle 0.000, 0.025 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.000, 0.040 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R'_2 = (N_2, C'_k, X'_{k2}) = \begin{bmatrix} N_2 & C_1 & \langle 0.025, 0.100 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.025, 0.100 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R'_3 = (N_3, C'_k, X'_{k3}) = \begin{bmatrix} N_3 & C_1 & \langle 0.100, 0.250 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.100, 0.250 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R'_4=(N_4,C'_k,X'_{k4})=\begin{bmatrix} N_4 & C_1 & \langle 0.250,0.500 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.250,0.500 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R'_5=(N_5,C'_k,X'_{k5})=\begin{bmatrix} N_5 & C_1 & \langle 0.500,1.000 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.500,1.000 \rangle \end{bmatrix}。$$

(5) 一级因子可拓节域。

$$R'_p=(P',C'_k,X'_{kp})=\begin{bmatrix} P' & C'_1 & \langle 0.000,1.000 \rangle \\ & C'_2 & \langle 0.000,1.000 \rangle \end{bmatrix}。$$

(6) 一级因子待评物元。

$$R'=(p',C'_k,x'_k)=\begin{bmatrix} p' & C'_1 & 0.145 \\ & C'_2 & 0.499 \end{bmatrix}。$$

通过各级因子特征值求解,一级因子指标水的影响程度、衬砌结构特征值分别为 4.348、2.507,综合等级特征值为 3.918,其表示的意义为病害等级程度介于较严重和严重之间。

金温货线部分隧道中湖边一号隧道、小寺一号隧道和魁市隧道通过分级因子评价,隧道衬砌结构状态评价结果如表 5 所示,其中湖边一号隧道综合等级特征值为 3.918,小寺一号隧道综合等级特征值为 2.544,魁市隧道综合等级特征值为 2.535。评价结果与金温货线隧道实际进行对比,根据《铁路运营隧道衬砌安全等级评定暂行规定》规定,以上三处隧道评价结果分别为严重、较严重和较严重,与本文方法评价的结果较为吻合,可见该方法具有一定的工程应用价值。

表 3 分级因子指标权重分配值

一级因子	二级因子	权重值	
		一级权重	二级权重
k=1	U ₁₁	0.699	0.441
	U ₁₂		0.046
	U ₁₃		0.148
	U ₁₄		0.181
	U ₁₅		0.087
	U ₁₆		0.097
k=2	U ₂₁	0.301	0.248
	U ₂₂		0.197
	U ₂₃		0.191
	U ₂₄		0.364

表 4 各级因子指标等级关联度

待评指标		单指标关联度				
		D	C	B	A	AA
二级因子	k=1	-0.340	-0.340	-0.207	-0.082	0.072
	k=2	-0.295	-0.295	-0.557	-0.283	-0.510
一级因子		-0.459	-0.459	-0.266	0.041	-0.333

表 5 隧道衬砌结构评价结果与实际情况比较

隧道名称	综合等级特征值	评价结果	实际情况
湖边一号隧道	3.918	B~A	严重
小寺一号隧道	2.544	C~B	较严重
魁市隧道	2.535	C~B	较严重

5 结论

将可拓理论及组合权重赋值法(熵权法和专家意见法的权重取值方法)引入到铁路隧道衬砌结构状态评价中,根据现场隧道检测资料,归纳总结衬砌结构影响因子,提出基于可拓理论及组合权重赋值的分级评价方法,并以金温货线部分隧道为例,验证其正确性。主要结论如下。

(1)参照铁路隧道衬砌结构评价体系建立的原则,建立基于可拓理论和组合权重赋值法的铁路隧道衬砌结构状态分级评价体系,并细化了评价分级方法的计算流程,解决了铁路隧道衬砌结构定性一半定性评判因子取值的难题。

(2)在权重取值过程中,采用熵权法和专家意见法相结合,提出一种考虑不同评价等级变化的组合权重赋值方法,有针对性地对不同因子赋予合适的权重,使得各级因子权重值更有效、更合理。

(3)基于可拓理论及组合权重赋值的分级评价方法,对湖边一号隧道、小寺一号隧道和魁市隧道衬砌结构状态进行评价。结果表明,三处隧道衬砌结构综合等级特征值分别为 3.918、2.544、2.535,评价结果与隧道实际情况较为吻合,表明该方法具有一定的工程应用价值。

参考文献

[1] 罗建春,高菊如.既有铁路隧道病害分级方法与评价体系研究[J].现代隧道技术,2016(6):12-24.

[2] 王志伟,马伟斌,赵有明,等.高速铁路隧道结构状态模糊评价方法研究[J].铁道建筑,2017(6):58-82.

[3] 赵博剑,孔德琨,谭忠盛.基于层次分析理论的宜万铁路隧道病害评价体系[J].土木工程学报,2017(S2):243-248.

[4] 李俊松,仇文革.基于网络层次模糊综合评价的铁路隧道岩溶风险分析[J].铁道建筑,2011(6):22-25.

[5] 丁浩,江星宏.公路隧道渗漏水病害分级方法优化思考[J].公路交通技术,2017,6(33):89-94.

[6] 栗文辉,李向阳,彭文轩.基于模糊层次分析法的桥梁安全程度评估[J].科技和产业,2014(6):107-110.

[7] 李聪,姜清辉,周创兵,等.基于实例推理系统的滑坡预警判据研究[J].岩土力学,2011,32(4):1069-1076.

[8] 张勇慧,李红旭,盛谦,等.基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J].岩土力学,2010,31(10):3151-3156.

[9] 高亚满.基于熵权法的河南省智慧城市发展水平评价[J].科技和产业,2021,20(12):174-179.

[10] 张先起,梁川.基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2005,36(9):1057-1061.

[11] 杨卓,戎晓力,卢浩,等.基于熵权物元可拓理论的隧道塌方风险评估[J].安全与环境学报,2016(2):

- 15-19.
- [12] 梅一韬, 仲云飞. 基于熵权的大坝渗流性态模糊可拓评价模型[J]. 水电能源科学, 2011(8): 58-61.
- [13] 陈力, 汤霖, 左中秋, 等. 基于变异系数法和灰色关联度的高压并联电容器综合评价研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(5): 27-32.

Research on Graded Evaluation Method for Lining Structure State of Railway Tunnel Based on Extension Theory and Combined Weight Values

WANG Junlou¹, YU Chunyan², WAN Junli³, ZHANG Yuansheng⁴

(1. Beijing-kunming high-speed Railway Xikun Co. Ltd., Chongqing 400023, China; 2. Shanghai Tianyou Engineering Consulting Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Railway Construction Research Institute of China Academy of Railway Sciences Group Co. Ltd., Beijing 100081 China; 4. China Academy of Railway Sciences Shenzhen Research and Design Institute Co. Ltd., Shenzhen 518054, Guangdong, China)

Abstract: To scientifically evaluate the health of the lining structure through a comprehensive analysis of the structural disease of railway tunnel lining, a graded evaluation system for the structural state of railway tunnel lining was established based on extension theory and combined weight values and in line with the principles of developing an evaluation system of railway tunnel lining structure. The system refined the calculation process for graded evaluation. To obtain the weight values, by combining the entropy method with Delphi method, a method of weight assignment taking into account different grades of evaluation was proposed. On such a basis, an evaluation was given to the lining structure state in Lakeside No. 1 Tunnel, Xiaosi No. 1 Tunnel, and Kuishi Tunnel in the Jinhua-Wenzhou freight line. According to the results, the eigenvalues of the comprehensive grade of the lining structure in the three tunnels are 3.246, 2.544 and 2.535, respectively. The results agree well with the actual tunnel conditions, which verifies the reliability and effectiveness of the method.

Keywords: railway tunnel; graded evaluation; extension theory; combined weight values; lining tunnel structure