文章编号：1001-4632（2025）06-0111-12
引用格式：田甜，王少瑜，王石磊，等. 基于快速检测的高铁运营隧道衬砌状态节段化评价方法[J]. 中国铁道科学，2025，46（6）：111-122.
Citation：TIAN Tian，WANG Shaoyu，WANG Shilei，et al. A Segmented Evaluation Method for Tunnel Lining Condition Using Rapid Detection in High-Speed Railways [J]. China Railway Science，2025，46（6）：111-122.

基于快速检测的高铁运营隧道衬砌状态节段化评价方法

田 甜[1]，王少瑜[1]，王石磊[1]，朱华中[2]，赵宗泰[3]，张保卫[4]

（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 基础设施检测研究所，北京 100081；
2. 中国铁路南昌局集团有限公司 永安工务段，福建 永安 366000；
3. 中国铁路青藏集团有限公司 工务部，青海 西宁 810000；
4. 中国铁路兰州局集团有限公司 工务部，甘肃 兰州 730030）

摘 要：针对现行高铁隧道衬砌单指标评价法存在的效率低、评估维度单一等问题，结合高铁隧道运维需求，基于层次分析法建立多层级评价体系，并采用乘积标度法计算各指标的权重，构建一种适用于快速检测模式下的高铁运营隧道衬砌状态节段化评价方法。首先，选取裂缝、衬砌空洞和衬砌厚度不足作为准则层指标，构建新的隧道衬砌状态评价体系；其次，选取裂缝长度、位置及宽度作为方案层指标，并对指标进行权重赋值；然后，结合各指标权重构建面向衬砌节段评价的裂缝指数、缺陷指数和综合评价指数，即通过具体数值表示当前衬砌节段劣化程度的评价方法；最后，基于某高铁运营隧道实测数据对评价方法进行验证。结果表明：该方法不仅突破了传统方法仅关注单一病害的局限，还能清晰地表征不同节段的衬砌劣化程度，可有效识别存在单一严重病害或多源轻度病害叠加的劣化节段。与传统评价方法相比，该方法在状态表征的真实性方面具有显著提升，为高铁运营隧道的精准维护提供了理论依据和案例支持。

关键词：高铁运营隧道；衬砌状态；快速检测；层次分析法；节段化评价
中图分类号：U451^{+}.4 **文献标识码**：A **doi**：10.3969/j.issn.1001-4632.2025.06.11

当前我国铁路运营总里程已经突破16万km。截至2024年，建成并投入运营的铁路隧道共计18 997座，总长度达到2.4万km，其中80%以上的隧道于2000年后建成，最早修建的高速铁路隧道至今已有15年以上的运营时间。由于施工质量的不确定性、地质水文条件的复杂性，地质条件相差较大，导致隧道衬砌病害种类多、数量大，大大降低了隧道衬砌的安全性，严重危害到行车安全。为了满足路网隧道状态管理的迫切需求，实现及时、准确的隧道衬砌状态检测变得尤为重要。快速检测技术作为当前解决大规模隧道检测问题的重要手段，其核心在于以采用移动式检测设备为主，能够在短时间内完成对大量隧道的检测任务。日本、德国、美国以及我国铁科院、西南交通大学等研究机构均已研制出多款适用于隧道衬砌的快速检测设备[1-7]和相关智能识别算法[8-18]，实现了隧道衬快速检测和病害标识工作。

目前，大部分路局已经配属专业的隧道衬砌状态检测设备，极大地提升了检测效率，但是衬砌存在缺陷和病害将大幅降低其安全性，还需要研究科学可靠的评价方法以指导路局开展养修工作。王勇[19]、袁红运等[20]基于有限元模型分析了隧道衬

收稿日期：2025-03-13；修订日期：2025-12-02
基金项目：国家自然科学联合基金资助项目（U2469207）；中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题（J2023G013）；中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题（2024YJ216）
第一作者：田 甜（1988—），男，河南鹿邑人，高级工程师。E-mail：14171008@bjtu.edu.cn
通讯作者：王石磊（1985—），男，山东定陶人，研究员。E-mail：thilei@qq.com

砌病害和缺陷分级标准，提出了隧道衬砌评价方法。王永东等[21]采用数据挖掘的方法对衬砌病害之间的关联性展开研究，并选取具有代表性的评价指标，建立隧道衬砌状态综合评价模型。Ding等[22]根据裂缝基本参数建立了评价指标体系，使用BP神经网络并引入专家系统对衬砌状态预测结果进行校正。孔祥兴等[23]、Liu等[24]运用可拓学理论对隧道病害之间的关联性进行研究，获取能准确反映衬砌状态的指标。Huang等[25]提出了一种动态分析方法，利用失效模型、影响分析方法及层次模型建立隧道服役性能模型。Sun等[26]选取多个指标建立隧道全生命周期评价体系，使用灰色聚类法建立评价模型对隧道结构状态进行评价。Ai等[27]采用非平稳伽马过程模拟隧道衬砌结构性能退化过程，研究不同养护措施条件下隧道的性能以及养护成本。张素磊[28]引入健康度函数的概念，将隧道衬砌按照每10 m长为1个单元进行划分，对衬砌病害进行量化评价，得到不同指标的健康值，选取最低的健康值作为当前单元的评价结果。

已有不少学者提出的隧道衬砌状态评价体系实现了多维度综合评价，但受限于高铁运营隧道天窗时间较短，人工抵近检测已无法满足任务需求，使用车载式检测设备进行快速检测已成为当下隧道表观状态检测的主流模式。隧道内由于光照、衬砌表面脏污以及图像畸变的影响，车载式隧道表观检测设备对裂缝宽度、深度等指标的检测精度较差，难以实现评价指标的全覆盖筛选。当前对病害及缺陷的评定依据标准Q/CR405—2018《铁路桥隧建筑物劣化评定》[29]，其中仅对单个病害或缺陷进行评定，隧道管养人员无法清楚地掌握衬砌实际状态，亟须基于该规范构建适用于我国高铁运营隧道的衬砌状态评价方法，以保障衬砌结构安全和运营效能。

本文采用层次分析法构建隧道衬砌状态评价体系，建立了一种基于快速检测模式下的高铁运营隧道衬砌状态节段化评估方法，并通过工程实证研究验证了该方法的科学性和工程适用性。

1 隧道衬砌状态评价体系构建

评价指标的选取直接影响评价结果的准确性，不当的指标易导致评估偏差。指标数量不足将降低评价体系对衬砌状态的表征能力，而指标冗余则显著增加检测成本和评估复杂度。车载式检测设备可以检测裂缝、空洞、衬砌厚度不足、渗漏水以及衬砌结构变形这5个项目，在标准中对渗漏水的评价由渗漏状态和发生位置2项指标构成，但在实际检测过程中很少能直接检测出其渗漏状态，所以渗漏水往往是根据其发生位置进行评定。衬砌变形的评价指标为变形速率和变形量，只需要简单换算后即可得出。基于渗漏水和衬砌变形的评价方式直观明了，且不涉及多项指标，依据标准即可进行准确评价，不需要纳入评价体系进行研究。基于此，遵循科学性、完备性、简洁性、独立性、可操作性和层次性6项核心选取原则，结合现行检测设备性能和天窗作业时间约束，依据标准要求重点选取衬砌裂缝、衬砌空洞和衬砌厚度不足3类典型缺陷指标，构建符合高铁运营隧道特征的分级评价体系。

1）衬砌裂缝

衬砌裂缝作为最易辨识的表观病害，其发展程度直接影响结构承载性能[30−31]。当前主流检测设备均基于高清带有电荷耦合器件图像传感器的数码（Charge Coupled Device，CCD）相机实现隧道衬砌表面连续成像，可精准获取裂缝的长度、宽度、位置及走向等二维参数。受设备和环境因素制约，裂缝深度检测仍存在技术瓶颈：一方面三维形态解析算法尚未成熟，另一方面现有技术尚难以实现高效采集。基于可操作性原则，选取裂缝长度、宽度和位置作为核心2级评价指标，裂缝走向作为辅助参考指标，暂不考虑将深度参数纳入评价体系。

2）衬砌空洞

衬砌空洞将引发应力重分布，加剧衬砌开裂和失稳风险，对衬砌的稳定性造成显著威胁[32−33]。采用探地雷达作为核心检测技术，可原位获取空洞的长度、位置和环向范围等特征参数。因此，选取空洞长度、位置和环向分布范围作为2级评价指标。

3）衬砌厚度不足

衬砌厚度不足是威胁隧道结构安全的重要缺陷类型，该缺陷将直接削弱衬砌承载性能并诱发结构形变，极端情况下可能导致断裂、塌陷等灾难性破坏[34]。基于探地雷达检测技术，可获取衬砌厚度不足区段的几何特征参数。研究表明，缺陷严重程度除核心指标厚度比外，可通过纵向长度、环向范围和位置等指标综合表征。

基于层次分析法构建的隧道衬砌状态评价体系架构如图1所示。该体系以衬砌裂缝、衬砌空洞和

衬砌厚度不足作为准则层指标，其中衬砌裂缝下设长度、宽度和位置作为方案层指标，空洞和厚度不足评价则选取纵向长度、环向范围和位置作为方案层指标。

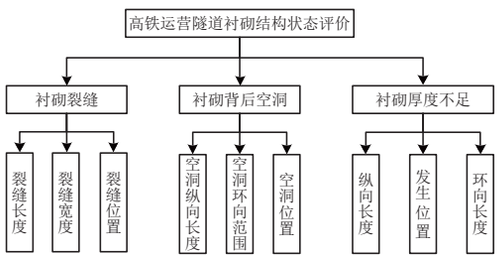


图1　衬砌状态评价体系架构

2　各级评价指标权重赋值

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）是美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代初期提出的一种主观赋值评价方法。层次分析法将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等多个层次，并在此基础上进行定性和定量分析，是一种系统、简便、灵活有效的决策方法。层次分析法计算简单，结果直观明确，但是该方法的结果偏差较大。为此，一些研究者对数学标度[35−37]进行了研究，提出了 9/9～9/1 标度法、10/10～18/2 标度法、指数标度法等标度法。

在隧道衬砌状态评价指标体系构建过程中，指标间重要性差异通常呈现渐进特征。当出现某指标较另一指标具有显著优势时，次要指标设置的必要性将显著降低。因此实际应用中通常仅需区分“同样重要”或“稍微重要”的等级差异，避免采用“强烈重要”或“极端重要”的极端对比。这种设置原则更符合工程实际需求。何金平等[38]提出了一种更加灵活的方法——乘积标度法，该方法只设置 2 个等级，即 2 个指标“同样重要”或“稍微重要”，以此作为基础进行递进乘积。当指标 A 与指标 B“同样重要”时，权重为 1∶1，当指标 A 比指标 B“略重要”时，权重为 1.354∶1。之后以此为基础进行递进乘积。

2.1　准测层指标权重赋值

比较衬砌裂缝、空洞和衬砌厚度不足这 3 项准则层指标之间的权重，衬砌厚度不足将造成衬砌的承载能力急速下降并造成掉块和衬砌结构变形，直接威胁隧道衬砌结构和行车安全，其重要程度要高于其他剩余指标。裂缝形成的原因较为复杂，并且裂缝的存在将直接影响衬砌的性能。空洞大多是前期在建造过程中因施工质量问题所遗留的，基本不会存在发展的现象。因此，就重要程度而言，准则层的关系为：衬砌厚度不足＞衬砌裂缝＞空洞，其权重分配为

$$\lambda:\mu:\tau=1.354:1:1.833 \tag{1}$$

式中：λ，μ和τ分别为衬砌裂缝、空洞、衬砌厚度不足的权重。

经过归一化后准则层指标的权重为

$$\lambda:\mu:\tau=0.323:0.239:0.438 \tag{2}$$

衬砌病害和缺陷的发生位置与衬砌的结构状态和列车的行车安全都紧密相关。隧道衬砌横断面分为拱顶、拱腰和边墙 3 个区域，不同区域设定的安全值见表 1。

表1　隧道衬砌区域安全值

衬砌区域	安全值
拱顶	1
拱腰	2
边墙	3

2.2　方案层指标权重赋值

基于层次分析法的标度原则，结合现场经验比较各方案层指标的重要性，裂缝位置“略重要”于裂缝长度和宽度，而后两者重要程度相同；空洞的纵向长度与环向范围则处于同一重要性层级，但相较于空洞位置的重要性等级要低 1 级；比较衬砌厚度不足的纵向长度、环向范围和位置的重要性，前两者处于同一重要性层级，但较衬砌厚度不足位置的重要性要低 1 级。综上所述，对方案层各指标权重赋值，有

$$\alpha_c:\beta_c:\varphi_c=1:1:1.354 \tag{3}$$

$$\alpha_d:\beta_d:\varphi_d=1:1:1.354 \tag{4}$$

$$\alpha_P:\beta_P:\varphi_P=1:1:1.354 \tag{5}$$

式中：α_c，β_c和φ_c分别为衬砌裂缝长度、宽度、位置 3 项指标的权重；α_d，β_d和φ_d分别为衬砌空洞的长度、环向范围、位置 3 项指标的权重；α_P，β_P和φ_P分别为衬砌厚度不足的长度、环向范围、位置 3 项指标的权重。

经过归一化后方案层指标的权重为

$$\lambda=(\alpha_c\ \ \beta_c\ \ \varphi_c)=(0.298\ \ 0.298\ \ 0.404) \tag{6}$$

$$\mu=(\alpha_d\ \ \beta_d\ \ \varphi_d)=(0.298\ \ 0.298\ \ 0.404) \tag{7}$$

$$\tau=(\alpha_P\ \ \beta_P\ \ \varphi_P)=(0.298\ \ 0.298\ \ 0.404) \tag{8}$$

将准则层和方案层各指标权重进行汇总，详见表 2。

表 2 各级指标权重系数

准则层指标	准则层指标权重	方案层指标	方案层指标权重
衬砌裂缝	0.323	裂缝长度	0.298
		裂缝宽度	0.298
		裂缝位置	0.404
空洞	0.239	空洞纵向长度	0.298
		空洞环向范围	0.298
		空洞位置	0.404
衬砌厚度不足	0.438	纵向长度	0.298
		环向长度	0.298
		发生位置	0.404

3 高铁隧道衬砌状态评价方法

以衬砌施工缝为隔断，将隧道结构划分为若干独立节段进行分段评估。为精确识别严重受损节段，构建了分项指标评价与节段综合评价相结合的双层体系。该体系可有效避免2类误判情形：一是总体评价良好但存在关键分项指标薄弱的节段，二是分项指标尚可但整体稳定性较差的节段。

3.1 衬砌表观裂损量化评价方法

日本[39]在研究岩石开裂量化评价方面发现，裂缝密度、展布方向和宽度等参数对岩体力学特性具有显著影响；并通过系统性定量分析，提出以裂缝张量F为表征的综合指标，该张量体系可同步表征裂缝的密度分布特征、方向性和规模等参数，为岩体状态评价提供了新的量化分析工具。

$$F=\frac{\pi}{4V}\sum_{i=1}^{n}r_i^3 w_i z_i \tag{9}$$

式中：V为岩石体积；n为该岩石包含的裂缝总数；r_i为第i个裂缝长度；w_i和z_i分别为第i个裂缝与岩石横向和纵向的夹角。

基于岩石开裂量化理论，提出适用于高铁运营隧道衬砌的裂缝评价方法—衬砌裂缝指数（Lining Crack Index，LCI）。日本岩土工程界广泛应用的“裂缝张量”法，因其参数计算便捷且评价精度优异，为本研究提供了理论基础。实际工程统计表明，高铁运营隧道中跨节段裂缝发生概率极低，故选取衬砌节段作为分析单元，将检测获得的裂缝投影至衬砌展开平面，实现裂缝空间分布的二维表征。检测到的裂缝在隧道衬砌展开平面上的投影示意图如图2所示。图中：L_a为节段环向范围展开长度；L_b为节段纵向长度；l_1和l_2分别为第1条裂缝和第2条裂缝的长度；θ_i为第i条裂缝与隧道轴向夹角。

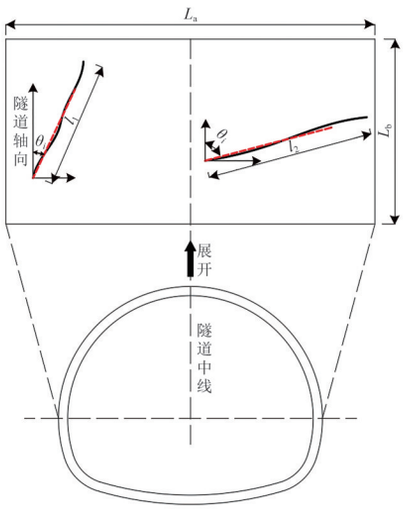


图 2 裂缝在隧道衬砌展开平面上投影示意图

建立以垂直于线路方向为x轴、以线路方向为y轴的分析坐标系，选取裂缝几何特征指标，并赋予差异化权重系数。传统评价体系主要依据裂缝长度和宽度判定损伤等级，但未充分考虑裂缝形态的力学效应。不同成因的裂缝具有差异性破坏效应，其走向特征对结构稳定性影响显著。为此，引入裂缝走向角度作为关键计算参数。裂缝量化表征式包含目标裂缝的长度、宽度、位置及其与x轴夹角4项指标，衬砌裂缝指数分为环向裂缝指数和纵向裂缝指数，计算方法如下。

环向裂缝指数F_{hk}为

$$F_{hk}=\sum_{i=1}^{n}\frac{\alpha_c l_i \beta_c w_i \sin\theta_i}{A_k \varphi_c \eta} \tag{10}$$

其中，

$$A_k=L_a L_b$$

纵向裂缝指数F_{zk}为

$$F_{zk}=\sum_{i=1}^{n}\frac{\alpha_c l_i \beta_c w_i \cos\theta_i}{A_k \varphi_c \eta} \tag{11}$$

节段内裂缝指数LCI为

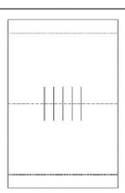
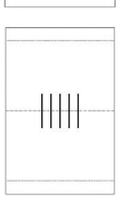
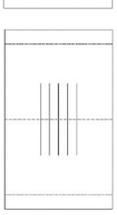
$$F_k=F_{hk}+F_{zk} \tag{12}$$

式中：k为节段号；w_i为第i条裂缝宽度；A_k为待计算节段单元面积；l_i为第i条裂缝长度；η为裂缝区域的安全值，取值见表1。

由裂缝长度、宽度和位置构成衬砌状态评价的核心指标，为验证裂损指数（Lining crack index，LCI）对各指标的敏感性，设置6种典型工况开展对比分析，计算结果详见表3。由表3可知：在等

长度条件下，3 mm宽裂缝的LCI值较1 mm宽裂缝提升298%；在等宽条件下，10 m长裂缝的LCI值较5 m长裂缝增加198%；该量化结果证实LCI指数能够灵敏表征裂缝尺寸变化，精准反映不同几何特征的裂缝对衬砌结构影响的差异；等长和等宽条件下，所处区域不同的组合裂缝，工况5（边墙＋拱顶）和工况6（拱顶＋拱顶）的LCI值分别是工况4（边墙＋边墙）的299%和398%，也证明LCI指数能准确反映裂缝位置对衬砌结构安全性的显著影响。

表3　不同指标对LCI指数的影响

工况	裂缝				LCI/10^{-5}
	示意图	位置	长度/m	宽度/mm	
工况1		拱顶	5	1	2.03
工况2		拱顶	5	3	6.08
工况3		拱顶	10	1	4.05
工况4		边墙＋边墙	10	3	1.10
工况5		边墙＋拱顶	10	3	3.29
工况6		拱顶＋拱顶	10	3	4.39

综上所述，所展示的衬砌裂缝指数LCI的优势在于能够将1个节段衬砌上的所有裂缝进行综合评价，即将裂缝的3种指标进行综合分析，并考虑各指标之间的权重，最终计算得出1个准确的结果，而不是只针对单条裂缝进行评判。

3.2　衬砌缺陷量化评价方法

参考衬砌裂缝指数LCI设计关于衬砌缺陷的量化评价指数LDI（Lining Defect Index），选取表1中关于缺陷的各项指标和权重系数，将衬砌缺陷指数分为空洞指数和衬砌厚度不足指数。空洞指数和衬砌厚度不足指数的量化表征均包含缺陷纵向长度、环向范围和所处位置3项指标，计算方法见式（13）—式（16）。

衬砌空洞指数Q_k为

$$Q_k=\frac{\sum_{m=1}^{q}\alpha_{\mathrm{d}}L_m\beta_{\mathrm{d}}R_m}{Q_{\max}\varphi_{\mathrm{d}}\eta} \tag{13}$$

衬砌空指数最大值$Q_{\max}$为

$$Q_{\max}=\frac{\alpha_{\mathrm{d}}L\beta_{\mathrm{d}}R_{\text{其他}}}{\varphi_{\mathrm{d}}\eta_{\text{其他}}}+\frac{\alpha_{\mathrm{d}}L\beta_{\mathrm{d}}R_{\text{拱顶}}}{\varphi_{\mathrm{d}}\eta_{\text{拱顶}}} \tag{14}$$

衬砌厚度不足指数H_k为

$$H_k=\frac{\sum_{j=1}^{h}\alpha_{\mathrm{P}}G_j\beta_{\mathrm{P}}T_j}{\omega_jH_{\max}\varphi_{\mathrm{P}}\eta} \tag{15}$$

衬砌厚度不足指数最大值$H_{\max}$为

$$H_{\max}=\frac{\alpha_{\mathrm{P}}L_{\text{其他}}\beta_{\mathrm{P}}R_{\text{其他}}}{\omega_{\text{其他}}\varphi_{\mathrm{P}}\eta_{\text{其他}}}+\frac{\alpha_{\mathrm{P}}L_{\text{拱顶}}\beta_{\mathrm{P}}R_{\text{拱顶}}}{\omega_{\text{拱顶}}\varphi_{\mathrm{P}}\eta_{\text{拱顶}}} \tag{16}$$

节段内衬砌缺陷指数LDI为

$$D_k=\mu H_k+\tau Q_k \tag{17}$$

式中：q为节段内空洞的总数；R_m为第m条空洞的环向范围；L_m第m条空洞的纵向长度；h为节段内衬砌厚度不足的总数；T_j为第j条衬砌厚度不足的环向范围；G_j第j条衬砌厚度不足的纵向长度；ω为衬砌厚度不足厚度比。

为验证LDI指数对缺陷的量化评估能力，设置3类典型工况开展实证分析。选取某高铁隧道典型区段作为研究对象，该区段涵盖3个衬砌节段，设置1号—7号共7条纵向测线进行衬砌质量检测。检测数据显示，1号—4号及6号测线存在多处缺陷。测得衬砌缺陷情况如图3所示。图中：L为缺陷的纵向长度。

从图3可以看出以下结论。

（1）工况7：K337＋189—K337＋199节段内1号—4号测线均有空洞存在，6号测线存在衬砌厚度不足，纵向长度均小于5 m，其中4号测线位于拱顶区域。

（2）工况8：节段K337＋199—K337＋209，

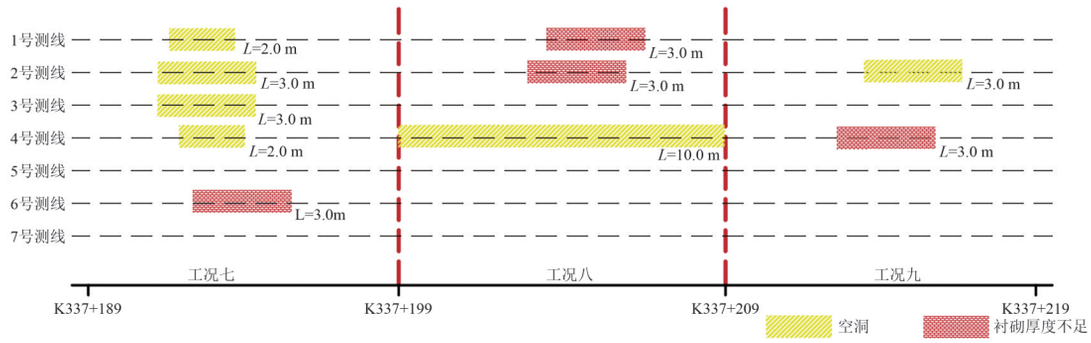


图3 衬砌缺陷实测情况

4号测线存在空洞，纵向长度达到10 m，贯穿整个节段，1号和2号测线存在衬砌厚度不足，纵向长度分别为3和2.7 m。

（3）工况9：节段K337+209—K337+219，4号测线存在衬砌厚度不足，纵向长度达到3 m，2号测线存在空洞，纵向长度为3 m。

对3种工况分别计算其缺陷指数，结果见表4。

表4 缺陷指数计算结果

工况	Q_k	H_k	D_k
7	1.51×10^{-1}	3.75×10^{-1}	3.74×10^{-2}
8	2.50×10^{-1}	7.50×10^{-2}	7.50×10^{-2}
9	3.74×10^{-2}	9.26×10^{-2}	3.44×10^{-2}

根据图3所示实测情况以及表4缺陷指数计算结果可以得出以下结论。

（1）空洞：工况7在相邻测线的相近位置均存在空洞，判定为存在1个环向范围覆盖4条测线的大型空洞，其4/5的面积位于非拱顶区域；工况8存在10 m纵向延伸的拱顶贯穿空洞；工况9则为存在1条纵向长度为3 m的拱顶局部空洞。对比分析显示：工况7中Q_k值仅为工况8的60%，显著差异表明Q_k指数具有空间分布敏感性，可有效区分位于不同区域的空洞危害程度；在纵向长度相近条件下，工况7的Q_k值达工况9的403%，该量级差异验证了Q_k指数对空洞环向覆盖范围的强敏感性，证明其能准确量化环向空洞范围对结构安全的梯度影响。

（2）衬砌厚度不足：工况7中的6号测线存在1段3 m长的衬砌厚度不足缺陷；工况8中相邻测线在相近位置存在衬砌厚度不足缺陷，推测为环向范围覆盖2条测线的衬砌厚度不足缺陷；工况9中4号测线位于拱顶处存在1段3 m长的衬砌厚度不足缺陷。对比分析表明：工况7的H_k值为工况8的200%；工况8的H_k值为工况9的50%，该差异也验证了H_k指数同样具备对衬砌厚度不足环向范围以及空间分布的强敏感性。

3.3 衬砌节段综合评价指数

隧道衬砌状态评价体系包含多维表征参数，不同病害参数存在量级差异的客观特性。裂缝的宽度以mm为单位，而衬砌缺陷均以m为单位，导致LCI与LDI指数数值域差异显著。当参数量级差异显著时，若直接采用原始数据建模，高量级参数将主导评估结果，而低量级参数的影响权重会被系统性压缩。为此必须通过标准化处理实现参数去量纲化，确保不同量级参数具有可比性，使裂缝微观特征与缺陷宏观形态在综合评价中获得等效表征。

在众多数据标准化方法中，极差标准化法和标准分数（Z-score）法具有广泛适用性。基于计算效率与指标特性的综合考量，选用极差标准化法实现参数归一化处理，将各指标值映射至［0，1］区间以消除量纲干扰。该方法依据指标属性差异进行分类处理：对于LCI和LDI等逆指标（指标值增大表征衬砌状态恶化），采用逆向转换式进行标准化处理。这种分类处理机制有效保持了不同属性指标与衬砌状态间的数学映射关系。

极差标准化（逆指标）的计算方法为

$$U'=\frac{U_{\max}-U}{U_{\max}-U_{\min}} \tag{18}$$

式中：$U_{\max}$为该数据中最大值；$U_{\min}$为该数据中最小值；U为该数据中任意值；U'为该数据中任意值标准化后的值。

利用极差标准化法对结果进行标准化处理后得到的裂缝指数、空洞指数以及衬砌厚度不足指数，其计算结果被控制在［0，1］区间，之后利用表1中准则层指标的权重计算得出衬砌状态的综合评价指数E，即

$$E=\lambda F_s+\mu H_s+\tau Q_s \tag{19}$$

式中：F_s为标准化处理后的裂缝指数；Q_s为标准化处理后的空洞指数；H_s为标准化处理后的衬砌厚度不足指数；λ，μ和τ为准则层指标的权重，取值见表1。

4　工程实例验证

某高铁隧道全长5 402 m，依据施工缝划分为463个独立节段，其线路穿越复杂地质区段。自运营以来，隧道普遍存在衬砌缺陷和开裂等病害。2023年专业检测机构对该隧道开展全断面检测，系统采集结果表现为裂缝和内部缺陷数据。运用上文所提出的隧道衬砌状态评价方法，计算得出各节段的LCI和LDI指数，并进行归一化处理，得出各节段衬砌的指数E。分别统计各节段LCI，LDI和指数E后绘制直方图并进行拟合。

LCI和LDI指数统计分析结果分别如图4和图5所示。

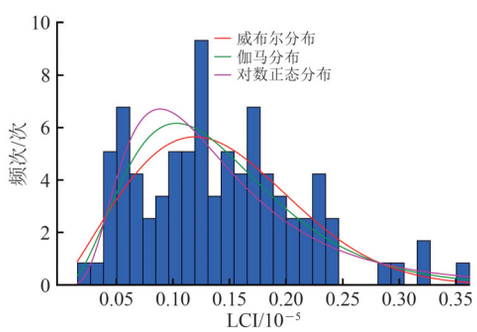


图4　LCI指数统计分析

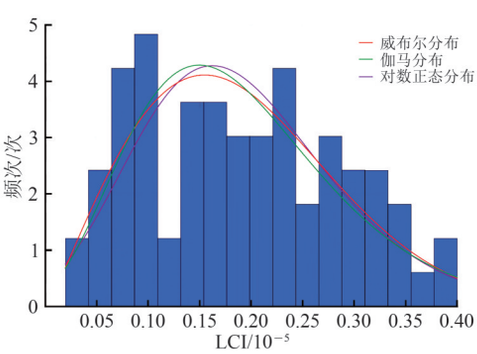


图5　LDI指数统计分析

在数理统计中，经常使用K-S检验法（Kolmogorov-Smirnov test）验证样本分布与理论分布的吻合性。从图4和图5可以看出：LCI和LDI指数直方图均呈现显著右偏分布。

针对偏态数据特性，选用对数正态分布、伽马分布及威布尔分布进行拟合优度检验。经K-S检验对比，对数正态分布的拟合优度最优，其概率密度曲线与实测数据吻合度最高。基于分布特征，采用95%分位数法确定指数阈值：当LCI≥2.39×10^{-5}或LDI≥2.60×10^{-5}时，判定为衬砌劣化显著节段。

使用本文所提出方法筛选出的重点区段与使用传统方法筛选出的重点节段对比见表5和表6。

表5　LCI指数选取的重点节段与存在重点裂缝的节段对比

本文提出方法		传统方法	
节段号	LCI/10^{-5}	节段号	重点节段
31	2.82	15	是
39	2.41	100	是
68	2.46	103	是
100	2.95	116	是
103	2.43	118	是
114	2.41		
115	3.17		
116	3.18		
118	3.62		

表6　LDI指数选取的重点区段与存在A级缺陷的区段对比

本文提出方法		传统方法	
节段号	LDI/10^{-1}	节段号	A级缺陷
20	4.00	19	是
22	2.75	20	是
26	2.75	28	是
28	3.62	35	是
29	2.63	36	是
35	3.91	51	是
36	3.70	55	是
51	2.82	56	是
55	2.73	59	是
56	2.64	69	是
59	2.60	72	是
69	2.72	74	是
72	3.68	75	是
74	3.28	76	是
75	2.71	88	是
76	3.50		
88	3.18		
89	2.75		
101	3.30		

由表5和表6可知：表5中对LCI指数超限节段与单指标判定的重点裂缝节段匹配，仅15号节段存在重点裂缝但未进入指数阈值范围。溯源检测数据发现，该节段内裂缝长度略大于规范中临界值，导致其LCI指数值略低于阈值。

表6数据显示19号节段存在A级缺陷但未被选入超限节段，进一步核查显示，19号节段缺陷纵向长度刚好等于规定中A级缺陷的临界值所以未被筛查出来。LCI与LDI指数既可准确筛选存在严重病害节段，又能识别多源轻度病害叠加的劣化区域。

对各节段的LCI和LDI指数进行归一化处理，得出各节段衬砌的指数E如图6所示。

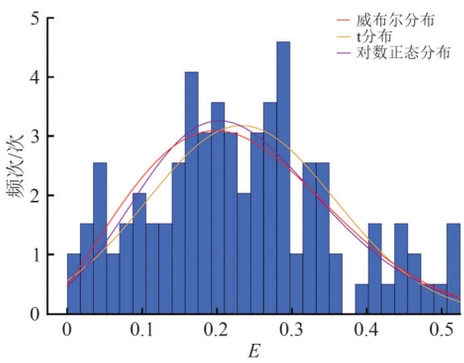


图6 衬砌状态综合评价指数统计分析

根据式（26）计算衬砌状态综合评价指数E，经K-S检验对比指数E的数据分布类型更加符合正态分布，但是考虑到样本数量较少，所以使用t分布进行拟合以及计算。按照t分布方法，采用95%分位数法确定指数阈值为$E\geqslant 0.27$，重点节段统计结果见表7。

表7 基于综合评价指数E筛选的重点区段

节段号	E	节段号	E
19	0.27	57	0.34
20	0.52	63	0.47
25	0.41	68	0.30
28	0.43	69	0.51
29	0.42	72	0.46
30	0.27	73	0.43
31	0.46	74	0.47
33	0.52	75	0.40
35	0.44	88	0.35
36	0.49	100	0.33
39	0.27	101	0.36
51	0.31	115	0.28
53	0.43	116	0.28
54	0.44	118	0.32
55	0.34	119	0.41
56	0.29		

通过整合表7（指数E超限节段）与表8（单项指数异常但指数E未超限节段），本文评价方法实现了隧道衬砌状态多维度风险节段的系统判别。首先基于分项指标筛选单指数超限节段，进而通过综合指数量化评估多病害叠加效应，最后整合所有超限节段。相较于传统单指标评价法，本文提出的衬砌状态量化评价方法可更全面、客观地反映衬砌结构的真实服役状态，为隧道安全评估与养护决策提供更可靠的技术支撑。而传统规范中的单指标评价法仅聚焦孤立病害，忽视了病害间的耦合效应—即便单一病害未达到重点关注等级，多病害的协同作用仍可能导致衬砌结构性能显著劣化。

表8 单项指数超限但综合指数未超限的节段

节段号	E	节段号	E
22	0.26	76	0.26
26	0.26	103	0.21
59	0.21	114	0.20

5 结 论

（1）本文所构建的隧道衬砌缺陷评价体系中，将裂缝、衬砌空洞及衬砌厚度不足作为准则层核心评价指标。针对裂缝缺陷，分别选取裂缝的长度、宽度及发生位置作为方案层细化评价指标；针对衬砌空洞和衬砌厚度不足2类典型缺陷，则均以其纵向长度、环向范围及位置作为方案层评价指标，最终采用乘积标度法完成各层级评价指标间的权重计算，为衬砌缺陷综合评价提供量化依据。

（2）相较于传统规范中的单指标评价法，通过系统分析节段内多类病害特征构建的隧道衬砌节段化状态评价方法实现了对隧道各节段衬砌状态的精细化评估，为评估隧道衬砌状态提供了一种可靠且细致的量化手段，显著提升了衬砌状态判识的准确性。

（3）基于某高铁运营隧道现场检测数据的系统分析可知，本文方法可精准辨识出2类特殊衬砌节段：一类为单项评价指数超限但综合评价指数未达阈值的节段，另一类为综合评价指数显著超限但单项指数无明显异常的节段。该方法所构建的分层评价机制，成功解决了传统规范中单指标评价法存在的评价盲区和局限性，从而更完整、客观地反映衬砌结构的真实工作性态，为隧道衬砌安全评估提供了更可靠的技术支撑。

参　考　文　献

[1] MONTERO R, VICTORES J G, MARTÍNEZ S, et al. Past, Present and Future of Robotic Tunnel Inspection [J]. Automation in Construction, 2015, 59: 99-112.

[2] FUJINO Y, SIRINGORINGO D M. Recent Research and Development Programs for Infrastructures Maintenance, Renovation and Management in Japan [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16 (1): 3-25.

[3] JIANG Y J, ZHANG X F, TANIGUCHI T. Quantitative Condition Inspection and Assessment of Tunnel Lining [J]. Automation in Construction, 2019, 102: 258-269.

[4] HUANG H W, CHENG W, ZHOU M L, et al. Towards Automated 3D Inspection of Water Leakages in Shield Tunnel Linings Using Mobile Laser Scanning Data [J]. Sensors, 2020, 20 (22): 6669.

[5] 李健超,张翠兵,柴雪松,等.基于图像识别技术的隧道衬砌裂缝检测系统研究[J].铁道建筑, 2018,58(1):20-24.
(LI Jianchao, ZHANG Cuibing, CHAI Xuesong, et al. Research on Crack Detection System of Tunnel Lining Based on Image Recognition Technology [J]. Railway Engineering, 2018, 58 (1): 20-24. in Chinese)

[6] 昝月稳, 苏国锋, 魏文涛,等.高铁隧道车载探地雷达检测技术及其应用[J].现代隧道技术,2018,55(增2):1288-1294.
(ZAN Yuewen, SU Guofeng, WEI Wentao, et al. Detection Technology of the Vehicle-Mounted GPR and Its Application in High-Speed Railway Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (Supplement 2): 1288-1294. in Chinese)

[7] LEE J S,CHOI I Y,LEE H U,等.隧道检测系统及其在韩国高速铁路隧道的应用[J].中国铁道科学,2004,25(3):22-26.
(LEE J S, CHOI I Y, LEE H U, et al. Tunnel Measurement System and Its Application to Korea High-Speed Rail Tunnels [J]. China Railway Science, 2004, 25 (3): 22-26. in Chinese)

[8] 暴学志,答治华,张翠兵,等.隧道衬砌空洞敲击回声特性[J].中国铁道科学,2023,44(4):144-152.
(BAO Xuezhi, DA Zhihua, ZHANG Cuibing, et al. Knocking Echo Characteristics of Tunnel Lining Cavity [J]. China Railway Science, 2023, 44 (4): 144-152. in Chinese)

[9] 周中,张俊杰,鲁四平.基于改进YOLOv4的隧道衬砌裂缝检测算法[J].铁道学报, 2023, 45(10):162-170.
(ZHOU Zhong, ZHANG Junjie, LU Siping. Tunnel Lining Crack Detection Algorithm Based on Improved YOLOv4 [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45 (10): 162-170. in Chinese)

[10] 许敏娟,陈莹莹,刘浩.基于全景图像的隧道渗漏水病害识别方法[J].铁道学报,2023,45(8):184-192.
(XU Minjuan, CHEN Yingying, LIU Hao. Identification Method of Tunnel Water Leakage Based on Panoramic Image [J]. Journal of the China Railway Society, 2023,45 (8): 184-192. in Chinese)

[11] 刘宇飞,樊健生,聂建国,等.结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望[J].土木工程学报,2021,54(6):79-98.
(LIU Yufei, FAN Jiansheng, NIE Jianguo, et al. Review and Prospect of Digital-Image Based Crack Detection of Structure Surface [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54 (6): 79-98. in Chinese)

[12] 武晓春,张恒骏,胡小溪.融合主动学习的地铁隧道衬砌表观病害检测[J/OL].上海交通大学学报,1-22[2025-08-30]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.079.
(WU Xiaochun, ZHANG Hengjun, HU Xiaoxi. Integration of Active Learning for Apparent Disease Detection in Subway Tunnel Lining [J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1-22[2025-08-30]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.079. in Chinese)

[13] 方力涵,张庆文,李卫国,等.基于改进YOLOv5的隧道衬砌病害精确检测方法[J].科学技术与工程,2025,25(16):6812-6820.
(FANG Lihan, ZHANG Qingwen, LI Weiguo, et al. Tunnel Lining Defects Precision Detection Method Based on Improved YOLOv5 [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25 (16): 6812-6820. in Chinese)

[14] 田阳,刘桂卫,崔庆国,等.铁路隧道衬砌病害轻量化智能检测技术研究[J].铁道工程学报,2025,42(02):85-90.
(TIAN Yang, LIU Guiwei, CUI Qingguo, et al. Research on Lightweight Intelligent Detection Technology of Railway Tunnel Lining Disease [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2025, 42 (2): 85-90. in Chinese)

[15] 李少华,沈翔,李树忱,等.基于多尺度网格的隧道衬砌裂缝目标检测方法[J].土木工程学报,2024,57(增1):95-101.

(LI Shaohua, SHEN Xiang, LI Shuchen, et al. Tunnel Lining Crack Target Detection Method Based on Multiscale Grid [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57 (Supplement 1): 95-101. in Chinese)

[16] 冯源,邓立,路景海,等.基于AI算法的隧道衬砌冷缝检测分类研究[J].铁道建筑,2025,65(1):99-103.
(FENG Yuan, DENG Li, LU Jinghai, et al. Research on the Detection and Classification of Cold Joints in Tunnel Lining Based on AI Algorithm [J]. Railway Engineering, 2025, 65 (1): 99-103. in Chinese)

[17] 韩青松,李生勇,徐红梅.基于改进布谷鸟搜索优化深度卷积网络的隧道衬砌裂缝检测算法研究[J].中国铁路,2024(10):52-59.
(HAN Qingsong, LI Shengyong, XU Hongmei. Research on Crack Detection Algorithm of Tunnel Lining Based on Improved Cuckoo Search Optimization Deep Convolutional Network [J]. China Railway, 2024 (10): 52-59. in Chinese)

[18] 侯斐斐,张智轩,崔广炎,等.DETR-MCA:基于探地雷达图像的隧道衬砌内部缺陷的智能检测算法[J].铁道科学与工程学报,2025,22(4):1840-1852.
(HOU Feifei, ZHANG Zhixuan, CUI Guangyan, et al. DETR-MCA: Intelligent Detection Algorithm for Tunnel Lining Defects Based on GPR Images [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22 (4): 1840-1852. in Chinese)

[19] 王勇.铁路隧道状态综合评价方法及检修周期策略研究[D].北京:中国铁道科学研究院, 2023.
(WANG Yong. Research on Comprehensive Evaluation Method of Railway Tunnel Condition and Maintenance Cycle Strategy [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences. in Chinese)

[20] 袁红运,陈礼伟,刘志强.单线铁路隧道衬砌纵向裂缝病害综合评价方法[J].现代隧道技术,2023,60(3):208-216.
(YUAN Hongyun, CHEN Liwei, LIU Zhiqiang. Comprehensive Evaluation Method for Lining Crack Disease of Single-Track Railway Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60 (3): 208-216. in Chinese)

[21] 王永东,叶铭,郑卓琦,等.基于病害关联性的运营隧道衬砌技术状况评价研究[J].隧道建设:中英文,2021,41(4):684-691.
(WANG Yongdong, YE Ming, ZHENG Zhuoqi, et al. Study on Evaluation of Lining Technical Condition of Operating Tunnel Based on Disease Correlation [J]. Tunnel Construction, 2021, 41 (4): 684-691. in Chinese)

[22] DING H, JIANG X H, LI K, et al. Intelligent Classification Method for Tunnel Lining Cracks Based on PFC-BP Neural Network [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 8838216.

[23] 孔祥兴,夏才初,仇玉良,等.基于可拓学理论的盾构隧道结构健康诊断方法[J].同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(11):1610-1615, 1698.
(KONG Xiangxing, XIA Caichu, QIU Yuliang, et al. Health Diagnosing Method for Shield Tunnel Based on Extension Theory [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39 (11): 1610-1615, 1698. in Chinese)

[24] LIU Y, TANG C A, WANG P Y, et al. Study on Disease Mechanism and Theoretical Quantification Method of Tunnel Structure [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 4398524.

[25] HUANG D W, ZHU H H, SHEN Y, et al. Resilient Analysis on Tunnel Structural Serviceability Based on Lifetime Dynamic Prediction Model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 129: 104690.

[26] SUN S N, XU C Y, WANG A L, et al. Safety Evaluation of Urban Underground Utility Tunnel with the Grey Clustering Method Based on the Whole Life Cycle Theory [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2022, 21 (6): 2532-2544.

[27] AI Q, YUAN Y, MAHADEVAN S, et al. Maintenance Strategies Optimisation of Metro Tunnels in Soft Soil [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13 (8): 1093-1103.

[28] 张素磊.隧道衬砌结构健康诊断及技术状况评定研究[D].北京交通大学, 2012.
(ZHANG Sulei. Study on Health Diagnosis and Technical Condition Assessment for Tunnel Lining Structure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. in Chinese)

[29] 中国国家铁路集团有限公司.Q/CR405—2018 铁路桥隧建筑物劣化评定[S].北京:中国铁道出版社,2018.
(China State Railway Group Co., Ltd. Q/CR405—2018 Assessment Standard for Structure Deterioration of Railway Bridge and Tunnel [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018. in Chinese)

[30] 王大鹏,王景春,张先萌,等.考虑列车荷载的隧道衬砌裂缝疲劳扩展可靠性分析[J].中国铁道科学,2023,44(6):95-102.
(WANG Dapeng, WANG Jingchun, ZHANG Xianmeng, et al. Reliability Analysis on Fatigue Propagation of Tunnel Lining Cracks Considering Train Load [J]. China Railway Science, 2023, 44 (6): 95-102. in Chinese)

[31] 刘勇,韩宇.基于断裂力学理论的隧道衬砌开裂病害分级[J].中国铁道科学,2019,40(3):72-79.
(LIU Yong, HAN Yu. Classification of Tunnel Lining Cracking Disease Based on Fracture Mechanics Theory [J]. China Railway Science, 2019, 40 (3): 72-79. in Chinese)

[32] 张旭,张成平,冯岗,等.衬砌背后空洞影响下隧道结构裂损规律试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(6):1137-1144.
(ZHANG Xu, ZHANG Chengping, FENG Gang, et al. Experimental Studies on Effect of Voids behind Tunnel Linings on Progressive Failure Process of Tunnel Structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (6): 1137-1144. in Chinese)

[33] 季维生.高速铁路隧道拱顶二次衬砌背后存在空洞时气动荷载对其的影响[J].中国铁道科学,2017,38(6):56-62.
(JI Weisheng. Influence of Aerodynamic Load on Secondary Lining of High-Speed Railway Tunnel with Cavity behind Vault Lining [J]. China Railway Science, 2017, 38 (6): 56-62. in Chinese)

[34] 张洋,王志杰,周平,等.隧道衬砌厚度不足对安全性能的影响[J].铁道建筑,2017,57(3):53-57.
(ZHANG Yang, WANG Zhijie, ZHOU Ping, et al. Influence of Tunnel Lining Insufficient Thickness on Its Safety Performance [J]. Railway Engineering, 2017, 57 (3): 53-57. in Chinese)

[35] 汪浩,马达.层次分析标度评价与新标度方法[J].系统工程理论与实践,1993(5):24-26.
(WANG Hao, MA Da. Scale Evaluation and New Scale Methods [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 1993 (5): 24-26. in Chinese)

[36] 沈德家,侯岳衡.指数标度及其与几种标度的比较[J].系统工程理论与实践,1995(10):43-46.
(SHEN Dejia, HOU Yueheng. Index Number Scale and Comparison with Other Scales [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 1995 (10): 43-46. in Chinese)

[37] 熊立,梁樑,王国华.层次分析法中数字标度的选择与评价方法研究[J].系统工程理论与实践, 2005(3):72-79.
(XIONG Li, LIANG Liang, WANG Guohua. Method Research on Selection and Valuation of Numeric Scale in Analytic Hierarchy Process [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2005 (3): 72-79. in Chinese)

[38] 何金平,李珍照,施玉群.大坝结构实测性态综合评价中的权重问题[J].武汉大学学报(工学版), 2001(3):13-17.
(HE Jinping, LI Zhenzhao, SHI Yuqun. Weight Question about Comprehensive Evaluating Dam Safety Monitoring Behavior [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001 (3): 13-17. in Chinese)

[39] 野城一栄, 水谷真基. 覆工のひび割れの密度とパターンによる山岳トンネルの要注意箇所抽出手法[R]. 东京: 鉄道総研報告, 2021.
(NOGUCHI I, MIZUTANI M. Extraction Method for Critical Areas in Mountain Tunnel Based on Crack Density and Pattern of Roofing [R]. Tokyo: Railway Research Institute Report, 2021. in Japanese)

A Segmented Evaluation Method for Tunnel Lining Condition Using Rapid Detection in High-Speed Railways

TIAN Tian[1], WANG Shaoyu[1], WANG Shilei[1], ZHU Huazhong[2], ZHAO Zongtai[3], ZHANG Baowei[4]

(1. Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Yong'an Track Maintenance Section, China Railway Nanchang Group Co., Ltd., Yong'an Fujian 366000, China;
3. Engineering Department, China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining Qinghai 810000, China;
4. Engineering Department, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730030, China)

Abstract: To address issues such as low efficiency and insufficient evaluation dimensions in the existing single-index evaluation method for high-speed railway tunnel linings, this study, aligning with the operation and maintenance requirements of high-speed railway tunnels, establishes a multi-hierarchy evaluation system based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and calculates the weights of each indicator using the product scale method. Consequently, a segmental evaluation method for the lining condition of in-service high-speed railway

tunnels under rapid detection mode is developed. First, cracks, lining voids, and insufficient lining thickness are selected as criteria-layer indicators to construct a novel tunnel lining condition evaluation system. Second, crack length, location, and width are chosen as scheme-layer indicators, followed by weight assignment for these indicators. Third, by integrating the indicator weights, a crack index, defect index, and comprehensive evaluation index tailored for lining segment evaluation are formulated—an evaluation method that quantifies the current deterioration degree of lining segments via specific numerical values. Finally, this method is validated using field-measured data from an in-service high-speed railway tunnel. The results indicate that the proposed method not only overcomes the limitation of traditional methods that focus solely on single defects but also clearly characterizes the lining deterioration degree of different segments. It effectively identifies deteriorated segments with either a single severe defect or superposed multiple mild defects. Compared with traditional evaluation methods, this approach significantly improves the authenticity of condition characterization, providing a theoretical basis and practical support for precise maintenance of in-service railway tunnels.

Key words: In-service high-speed railway tunnels; Lining condition; Rapid inspection; Analytic hierarchical method; Segmented evaluation

（责任编辑　张　琪）