

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.253

隧道衬砌裂缝病害量化评价改进乘积标度法

沈才华¹, 苗 森¹, 鲍希琰², 姜育科³

(1. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 2. 江苏省交通运输厅, 南京 210001;

3. 中交隧桥(南京)技术有限公司, 南京 211800)

摘要:隧道衬砌结构开裂是隧道养护工作中需重点防治的病害,隧道智慧管养的发展急需可推广应用的隧道衬砌结构裂缝病害定量评价方法。引入裂缝图像自动识别技术,融合乘积标度法和规范要求建立了单裂缝病害和衬砌结构区间段多裂缝病害量化评价指标体系,提出了指标阈值确定方法。单裂缝病害诊断方法以衬砌裂缝的长度、宽度作为主要评价指标,深度、方向和发展性作为辅助评价指标;多裂缝病害诊断方法以衬砌裂缝的长度、宽度作为主要评价指标,深度、方向、发展性和分布密度作为辅助评价指标。指标阈值确定既考虑了均匀分布函数概率分布特性,又结合了隧道结构受力安全性特点,并对评价方法的分值进行了系统的无量纲标准化处理,编制了可推广应用的软件。案例分析显示本方法基本科学合理,为实现隧道开裂病害智能识别和养护方案自动决策提供了新途径。

关键词:隧道衬砌;乘积标度法;裂缝病害;病害诊断;层次分析法

中图分类号:U457

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)02-062-12

Improved product scale method for quantitative evaluation of tunnel lining crack diseases

SHEN Caihua¹, MIAO Miao¹, BAO Xiyan², JIANG Yuke³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China;

2. Department of Transport of Jiangsu Province, Nanjing 210001, P. R. China; 3. CCCC Tunnel Bridge (Nanjing)

Technology Company Limited, Nanjing 211800, P. R. China)

Abstract: Cracking in tunnel lining structures is a critical issue requiring effective prevention and control during tunnel maintenance. The development of intelligent tunnel management and maintenance urgently requires a quantitative evaluation method for tunnel lining cracking diseases that is practical and broadly applicable. This study introduces an automatic crack image recognition technology and establishes a quantitative evaluation index system and threshold determination method for both single crack diseases and multi-crack diseases in tunnel lining

收稿日期:2023-10-02 网络出版日期:2024-03-28

基金项目:国家自然科学基金(52278400,41830110);江苏省交通运输厅科技计划项目(2022Y04);中交养护集团2020年重大科技研发项目(27100020Y251,27100020Y248)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52278400, 41830110), Technology Plan Project of Department of Transportation of Jiangsu Province(2022Y04), and Major Technology Research and Development Project of China Communication Construction Maintenance Group Co., Ltd. in 2020(27100020Y251, 27100020Y248).

作者简介:沈才华(1976—),男,博士,副研究员,主要从事隧道与地下工程教学科研工作,(E-mail)shencaihoa@163.com。

通信作者:苗森,女,硕士研究生,主要从事隧道与地下工程研究工作,(E-mail)530356828@qq.com。

sections. This is achieved by integrating the product scale method with established specification requirements. For single crack disease diagnosis, the primary evaluation indexes are crack length and width, with depth, orientation, and development serving as auxiliary indexes. For multi-crack disease diagnosis, the main indexes remain crack length and width, while depth, orientation, development, and distribution density are included as supplementary indexes. Threshold determination incorporates the probability distribution characteristics of uniform distribution functions alongside the safety characteristics of tunnel structures under stress conditions. The evaluation scores have been systematically standardized to eliminate dimensional inconsistencies, and software has been developed for practical application. A case analysis shows the scientific validity of this method, providing a novel approach to intelligent identification of tunnel cracking diseases and automated maintenance decision-making.

Keywords: tunnel lining; product scaling method; crack disease; disease diagnosis; analytic hierarchy process

隧道衬砌开裂渗漏水在隧道病害中占比超过60%,是养护工作中重点防治的病害。养护工作中裂缝检测工作量巨大,裂缝自动识别检测成为研究热点,但对于识别后裂缝病害的诊断目前研究很少,亟待创新,形成真正对养护方案决策起到支撑作用的裂缝病害诊断技术。

罗鑫^[1]采用乘积标度法确定了指标层指标的标度权重,采用模糊理论和人工神经网络确定了准则层指标的权重,建立了公路隧道健康状态的模糊综合评价模型,实现了对公路隧道健康状态的定量化综合评价;这构建了隧道管理中较为完整的定量化诊断方法和系统,但无法及时定位到具体问题及出现问题的部位,日常养护中无法进行大量推广。

很多学者对裂缝的安全评估进行研究。王华牢等^[2]建立了衬砌裂缝的定性判定标准,从裂缝的长度、宽度、部位及深度4个指标对隧道主要裂缝进行安全评价并给出安全等级,在裂缝安全性评价时考虑定性定量结合,然而宽度和长度在评定时共用1个权重,评价的准确度还有欠缺。薛晓辉等^[3]基于可拓学理论,建立了以物元关系为基础的带裂缝隧道衬砌可靠性评价的物元模型和方法,并提出了评价体系,综合考虑了裂缝的长度、宽度、深度、宽度变化量等因素,但综合判定时还未形成量化的方法。周元德等^[4]从振动频谱特性角度,探讨动载频率属性对衬砌结构的裂缝病害安全评价的影响机制,对含裂缝病害的高铁隧道衬砌结构安全进行评价并给出建议,为隧道裂缝的评价指标提供了新思路。蔡俊华^[5]模拟裂缝对衬砌内力的影响,验证了扩展有限元法评价隧道衬砌安全性的可行性,为衬砌病害的评估提供了理论基础;贺志勇等^[6]等建立典型裂缝断面的有限元模型,并对隧道衬砌结构的承载能力进行安全性分析,在带裂缝隧道衬砌安全等级评定时考虑了裂缝的长度、宽度、深度和发展性,在对隧道衬砌裂缝监测的前期工作中可以有针对性地对某些裂缝进行重点跟踪监测。这些研究大多是对裂缝进行定性的安全性评估,尚未形成量化的评价标准。

石钰锋等^[7]开发出一套基于隧道衬砌全景图像方法的隧道表面衬砌裂缝识别评价系统,实现了对缺陷的精细化描述定位,主要从裂缝位置、长度、方向等方面进行量化分析,使得裂缝识别评价科学更为快速,为裂缝的安全评价提供了技术支撑。

在养护管理中,隧道裂缝病害识别技术发展迅速,但对裂缝病害的诊断还未形成可推广应用的理论方法,以定性评价为主,定量评价时确定阈值非常困难。因此,笔者采用改进乘积标度法来确定影响隧道裂缝的评价指标的权重,建立裂缝病害量化诊断的计算公式来得到隧道裂缝健康状态的参考值 F_n ,设置分级评价标准,将裂缝病害的健康等级划分为3级并根据不同健康状态给予不同的养护建议。使用基于改进乘积标度法的裂缝病害量化诊断新方法,大大提高了隧道中裂缝的诊断效率与准确度,并给出合理的养护措施。

1 基于改进乘积标度法的裂缝病害定量评价思想

目前常用的评价指标权重选取方法^[8]有专家调查法、层次分析法、主成分分析法、故障树法等。美国运筹学家 T. L. Saaty 在上世纪 70 年代提出了层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)。层次分析法是系统定

量分级计算中比较常用的方法,可以帮助决策者在面对复杂的决策问题时,将问题分解为多个层次,采用量化的方法对各个层次进行比较和权衡,从而得出决策结果。这种方法采用数字标度的形式将定量与定性相结合,将人的主观判断用数量形式表达和处理,从而提高了决策的有效性、可靠性和可行性。

层次分析法的基本思路是将决策问题分解为多个层次,即由复杂问题逐层分解成简单的问题,这些从总体目标开始,逐层划分为上层目标、准则和方案等,形成一个有序的层次结构。对于每个层次的准则或方案,需要建立一个判断矩阵,用于权衡它们之间的重要程度或优劣性。通过计算判断矩阵的特征向量和最大特征值,可以得出每个准则或方案的权重,还需要进行一致性检验,确保判断矩阵的一致性。根据各个层次的权重,通过具有逻辑性、实用性和系统性的层次分析进行综合评价,最终得出决策结果。

层次分析法存在一些缺点:如1~9数字标度法有时并不合理,需要对判断矩阵进行一致性检验,计算过程较为繁琐。因此,何金平等^[9]在层次分析法的基础上,兼顾大坝结构实测性态综合评价的客观特点,提出一种赋权方法,在数字标度上改进,去掉“强烈大”“极端大”和“明显大”的情况,在评价指标A与评价指标B的重要性“相同”或“稍微大”的基础上递进乘积分析,使得权重的确定更加规范化且具有更大的灵活性。乘积标度法中“相同”的标度值为 $\omega_A:\omega_B=1:1$;“稍微大”的标度值为 $\omega_A:\omega_B=1.345:1$ 。

衬砌裂缝进行安全性评价时,评价指标间也不应出现“强烈大”“极端大”和“明显大”的情况,否则指标设置后存在意义极小。通过乘积标度法,裂缝评价指标间的权重确定是合理、可行的。

在本文中,基于乘积标度法的裂缝病害定量评价方法的思想为:分别找出单裂缝和多裂缝的评价指标并设置分级阈值建立各指标的评价标准,将评价指标两两比较重要程度得到权重,根据所有指标之间的相对权重,归纳出裂缝病害健康状态参考值 F_n 的计算公式,来诊断衬砌裂缝的健康状况。

2 基于改进乘积标度法的单裂缝病害量化诊断方法

2.1 单裂缝病害量化诊断的评价指标及权重确定

隧道的安全状态评价是多指标耦合作用下的综合评价^[10],衬砌裂缝的安全性评价也是如此,选取的评价指标应当具有普遍性,适用于尽可能多的隧道;也不宜过于复杂,评价时直观且易于操作。

目前裂缝的图像识别通常只能获取长度和宽度的参数。参考现有的国内外规范,大部分仅对裂缝的长度、宽度设立评定标准,对裂缝的总体技术状况划分等级,但评价还停留在定性阶段,更多依赖于专家给出判定。结合现有的与衬砌裂缝评价相关的文献,单裂缝的深度、发展性和方向这些因素在评价时也常被纳入考虑。

因此,对于单裂缝而言,选择长度、宽度、深度、发展性及方向作为评价指标。通常认为在衬砌裂缝的指标中,衬砌裂缝的长度和宽度的重要性最大,且重要性相同,在评价时作为主要评价指标。从可操作性和准确性的角度,深度、发展性和方向在对衬砌裂缝的形态反映方面不如衬砌裂缝的长度和宽度重要,且这3个评价指标可认为具有相同的重要性,将衬砌裂缝的深度、发展性和方向作为辅助判定指标。令衬砌单裂缝的评价指标:“长度”“宽度”“深度”“发展性”及“方向”的权重分别为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 和 ω_5 ,对应的指标评价得分分别为 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 、 γ_4 和 γ_5 。

由乘积标度法可计算得: $\omega_1:\omega_2:\omega_3:\omega_4:\omega_5=1.345:1.345:1:1:1$,且 $\omega_1+\omega_2+\omega_3+\omega_4+\omega_5=1$,则权重为: $\omega_1:\omega_2:\omega_3:\omega_4:\omega_5=0.237:0.237:0.176:0.175:0.175$ 。

对裂缝的长度、宽度、深度、方向和发展性建立各自的评价标准,并对各个等级赋分,设定分值为 h_{ij} ($i=1\sim 5, j=1\sim 3$),评价标准如表1~5所示。在进行单裂缝的安全性评价时,建立关于裂缝健康状态参考值的公式,思路大致为:单裂缝的第 i 个($i=1, 2, 3, 4, 5$ 分别对应多条裂缝的长度、宽度、深度、发展性和方向)评价指标的评价分值为 γ_i ;每个指标的满分为6分;每个评价指标得分与满分6分之比再乘以权重,逐项累加即为单裂缝健康状况的参考值 F_n 。衬砌裂缝的指标在无法得到完整的各项参数时,设定默认值 $h_{1j}\sim h_{5j}$,其中, h_{1j} 、 h_{2j} 、 h_{3j} 和 h_{5j} 的默认评分取4分, h_{4j} 的默认评分取3分。这样取值偏保守,能够对无法获取完整参数的隧道裂缝作出较为合理的判断。

根据《公路隧道养护技术规范》(JTGH12—2015)^[11]和《公路海底隧道土建结构养护技术规范》(DB35/T 1941—2020)^[12],将裂缝的长度 l ,以5 m和10 m作为划分依据,分3个等级,设定评价的总分为6分,长度的评分为 γ_1 。长度的评分标准如表1所示。

表1 单裂缝长度的评分标准

Table 1 Scoring criteria for the length of a single crack

评分标准	分值 h_{1j} (j 的取值为1,2,3)
$l < 5 \text{ m}$	6
$5 \text{ m} \leq l < 10 \text{ m}$	4
$l \geq 10 \text{ m}$	2

根据《公路隧道养护技术规范》(JTGH12—2015)^[11]《公路海底隧道土建结构养护技术规范》(DB35/T 1941—2020)^[12]和《城市轨道交通设施运营监测技术规范 第3部分:隧道》(GB/T39559.3—2020)^[13],将裂缝的最大宽度 b ,以0.2 mm和0.5 mm作为划分依据,分3个等级,设定评价的总分为6分,宽度的评分为 γ_2 。宽度的评分标准如表2所示。

表2 单裂缝宽度的评分标准

Table 2 Scoring criteria for the width of a single crack

评分标准	分值 h_{2j} (j 的取值为1,2,3)
$b < 0.2 \text{ mm}$	6
$0.2 \text{ mm} \leq b < 0.5 \text{ mm}$	4
$b \geq 0.5 \text{ mm}$	2

参考罗鑫^[1]和薛建锋^[14],将深度达衬砌厚度1/3作为结构安全预警值,并结合《公路隧道养护技术规范》(JTGH12—2015)^[11],将裂缝的最大深度 h ,以混凝土保护层厚度 c 的1/3值或2/3值或以默认值1.5 mm和3 mm作为划分依据,分3个等级,设定评价的总分为6分,深度的评分为 γ_3 。深度的评分标准如表3所示。

表3 单裂缝深度的评分标准

Table 3 Scoring criteria for the depth of a single crack

评分标准	分值 h_{3j} (j 的取值为1,2,3)
$h < \frac{1}{3}c$ 或 $h < 1.5 \text{ mm}$	6
$\frac{1}{3}c \leq h < \frac{2}{3}c$ 或 $1.5 \text{ mm} \leq h < 3 \text{ mm}$	4
$h \geq \frac{2}{3}c$ 或 $h \geq 3 \text{ mm}$	2

参照《铁路桥隧建筑物劣化评定 第2部分:隧道》(Q/CR 405.2—2019)^[15],将裂缝的发展性,以发展和不发展划分,设定评价的总分为6分,发展性的评分为 γ_4 。发展性评分标准如表4所示。

表4 单裂缝发展性的评分标准

Table 4 Scoring criteria for the development of a single crack

评分标准	分值 h_{4j} (j 的取值为1,2)
不发展	6
发展	3

根据宋兵辉^[16]和杨新安等^[17],方向和长度、宽度一样,属于衬砌裂缝形态特征,裂缝分为纵向裂缝、错位周围裂缝、环向裂缝和斜裂缝4种。将裂缝的方向定为 α (裂缝与隧道水平向的夹角),以 30° 和 60° 为划分依据,设定评价的总分值为6分,方向的评分为 γ_5 。方向的评分标准如表5所示。

表5 单裂缝方向的评分标准

Table 5 Scoring criteria for the direction of a single crack

评分标准	分值 h_j (j 的取值为1,2,3)
$\alpha < 30^\circ$	6
$30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$	4
$\alpha \geq 60^\circ$	2

2.2 单裂缝病害量化诊断健康状态的参考值 F_1 的计算公式

张琳琳^[18]针对重大水工混凝土结构健康状况综合诊断,建立了“健康值”的概念,将诊断指标值无量纲化为0~1,方法比较科学合理。借鉴该思想,结合裂缝病害特点,采用乘积标度法确定评价指标的权重,融合规范要求,构建了裂缝评价指标分值的分级阈值,得到单裂缝健康状态的参考值 F_1 计算公式为: $F_1 = \frac{\gamma_1}{6} \times \omega_1 + \frac{\gamma_2}{6} \times \omega_2 + \frac{\gamma_3}{6} \times \omega_3 + \frac{\gamma_4}{6} \times \omega_4 + \frac{\gamma_5}{6} \times \omega_5$ 。将衬砌单裂缝评价指标的权重代入公式,得: $F_1 = \frac{\gamma_1}{6} \times 0.237 + \frac{\gamma_2}{6} \times 0.237 + \frac{\gamma_3}{6} \times 0.176 + \frac{\gamma_4}{6} \times 0.175 + \frac{\gamma_5}{6} \times 0.175$ 。其中, γ_1 、 γ_2 、 γ_3 、 γ_4 和 γ_5 分别对应的时单裂缝长度、宽度、深度、发展性和方向的评价得分。

2.3 单裂缝病害健康状态的参考值 F_1 阈值的确定

综合分析借鉴《铁路桥隧建筑物劣化评定 第2部分:隧道》(Q/CR 405.2—2019)^[15]中铁路隧道劣化等级划分和杨启航^[19]对国内外隧道健康等级划分方案的总结,将单裂缝健康状况(即单裂缝健康状态参考值的阈值)分为3级:轻微、一般、严重,并给出建议的养护措施。

单裂缝健康状态参考值的阈值采用2种思路分别计算后综合确定。第1种思路:结合经验针对代表性特征裂缝进行特征分析,轻微和一般分级阈值代表性特征裂缝的参数及健康状态参考值如表6所示,一般和严重分级阈值代表性特征裂缝的参数及健康状态参考值如表7所示, F_1 结果相同的代表性特征裂缝未列,例如:长度和宽度指标分值互换后 F_1 结果相同,则只列一种情况。

表6 轻微和一般分级的代表性单裂缝评价价值

Table 6 Representative single crack evaluation values for minor and general grades

序号	长度得分	宽度得分	深度得分	发展性得分	方向得分	F_1
1	6	6	6	6	6	1.000 0
2	6	6	4	3	4	0.795 5
3	6	4	6	6	6	0.921 0
4	6	4	4	3	6	0.774 8
5	6	4	4	6	6	0.862 3
6	6	4	4	3	6	0.774 8
7	4	4	4	6	6	0.783 3
8	4	4	4	3	6	0.695 8
9	6	2	6	6	6	0.842 0
10	6	2	4	3	6	0.695 8
11	6	2	2	6	6	0.724 7

根据表 6 计算结果,结合经验分析,从第 8、10 和 11 组的 F_1 数值考虑轻微和一般等级的分界值,而第 11 组的情况有 2 个评价指标取得最低分,不太适合归于轻微健康状态。因此,分界线(单裂缝健康状态参考值的阈值)取值为 0.725。

表 7 一般和严重分级的代表性单裂缝评价值

Table 7 Representative single crack evaluation values of general and severe grades

序号	长度得分	宽度得分	深度得分	发展性得分	方向得分	F_1
1	4	4	4	3	4	0.637 5
2	4	4	2	6	6	0.724 7
3	4	2	6	6	6	0.763 0
4	4	2	4	6	6	0.704 3
5	4	2	4	3	6	0.616 8
6	4	2	2	6	6	0.645 7
7	4	2	2	3	6	0.558 2
8	4	2	2	2	6	0.529 0
9	2	2	6	6	6	0.684 0
10	2	2	4	6	6	0.625 3
11	2	2	4	3	6	0.537 8
12	2	2	2	6	6	0.566 7
13	2	2	2	3	6	0.479 2
14	2	2	2	3	2	0.362 5

根据表 7 计算结果,第 5 和第 6 组的 5 个评价指标中有 2 项取得最低分值,结合经验,考虑将第 6 组的数值 0.646 设置为一般和严重组别的分界值。同时,第 14 组的数值 0.362 是单裂缝评价方法的最小值,为严重等级的下限值。

单裂缝健康状态的参考值 F_1 阈值确定的第 2 种思路为:采用均匀概率分布思想,列出在评价中所有可能出现的分值阈值数组,共 162 组情况,并对所有数组进行升序排列,取排名累积概率曲线 1/3 和 2/3 附近特征数组 F_1 的值分别为 0.637 2 和 0.725 3(见表 8),即一般与严重的等级分界值为 0.637,轻微和一般的分界值为 0.725。

表 8 单裂缝健康状态阈值确定特征情况

Table 8 Determination of characteristics of single crack health state threshold

序号	长度得分	宽度得分	深度得分	发展性得分	方向得分	F_1
1	2	2	6	6	4	0.625 7
2	4	4	2	3	6	0.637 2
3	6	2	2	3	6	0.637 2
4	6	2	6	6	2	0.725 3

综合 2 种思路获得的单裂缝健康状态参考值的阈值,最终建议轻微和一般的健康状态分界值阈值为 0.725,一般和严重的分界值阈值为 0.646,严重健康状态的参考值最小值为 0.362。单裂缝的安全评价等级如表 9 所示。

表 9 单裂缝病害健康判定等级及养护建议

Table 9 Health assessment level and maintenance suggestions for single crack diseases

F_1 值	裂缝分类	养护建议
$0.362 < F_1 \leq 0.646$	严重	及时修复治理
$0.646 < F_1 \leq 0.725$	一般	重点观察,进行养护备案
$0.725 < F_1 \leq 1$	轻微	正常养护

2.4 案例计算分析

裂缝自动识别程序在深度学习神经网络 Mask R-CNN 的基础上,通过计算裂缝骨架中所有像素点个数获得裂缝的长度,再提取裂缝骨架进行二次函数拟合,得到裂缝的宽度参数。同本文的裂缝评价方法结合,可以隧道裂缝自动检测与诊断,为养护方案的决策提供了技术支撑。

选取小方山隧道现浇混凝土衬砌某区间中的一条裂缝,通过裂缝自动识别程序识别裂缝图片后,得到评价指标的参数:长度为 0.01 m,最大宽度为 0.43 mm,如图 1 所示;在现场测量该条裂缝,最大深度为 1.8 mm,方向为 65° ,无发展趋势。

因此,该条裂缝各项评价指标得分情况为长度得 6 分,宽度得 4 分,深度得 4 分,方向得 2 分,发展性得 6 分。代入公式计算得到 F_1 得值为 0.746,健康等级为轻微,正常养护即可。

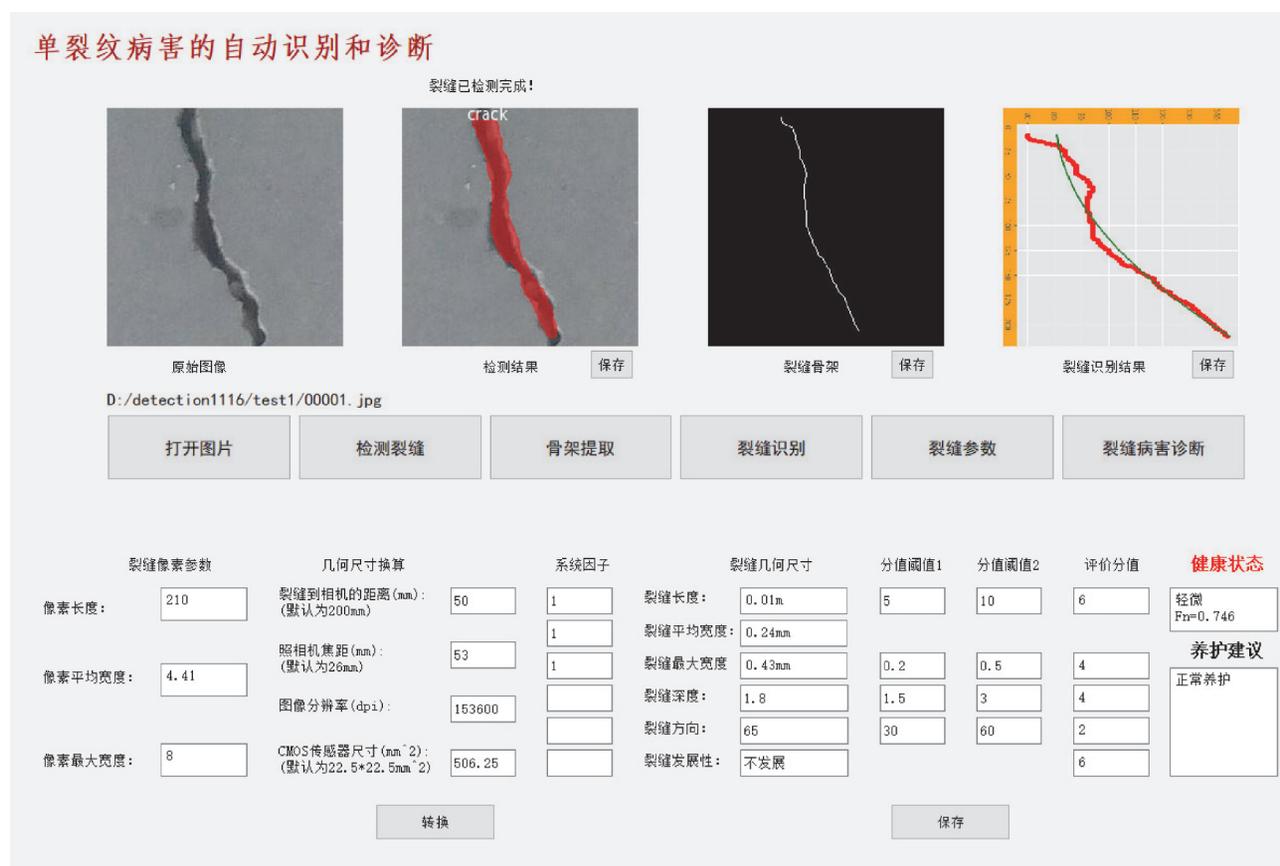


图 1 单裂缝病害健康状态诊断分析案例

Fig. 1 Diagnosis and analysis of health status of single crack diseases

3 基于改进乘积标度法的多裂缝病害量化诊断方法

3.1 多裂缝病害量化诊断的评价指标及权重确定

多裂缝在进行安全性评价时,分布密度常被纳入考虑。与单裂缝类似,采用多裂缝的长度、宽度作为主要评价指标,并且采用深度、发展性、方向及分布密度作为辅助判定指标,即多条裂缝的划分有 6 个指标。令

衬砌裂缝的“长度”“宽度”“深度”“发展性”“方向”及“密度”的权重分别为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$ 及 ω_6 , 对应的指标评价得分分别为 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ 和 γ_6 。

通过乘积标度法计算可得: $\omega_1: \omega_2: \omega_3: \omega_4: \omega_5: \omega_6 = 1.345: 1.345: 1: 1: 1: 1$, 且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 = 1$ 。则权重为: $\omega_1: \omega_2: \omega_3: \omega_4: \omega_5: \omega_6 = 0.202: 0.202: 0.149: 0.149: 0.149: 0.149$ 。

多条裂缝在处理时,与单裂缝的差别在于多条裂缝的评价指标得分是与其每个指标区间的占比相关。具体可以参照下文的多条裂缝的评价标准及依据。多条裂缝的第 i 个 ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 分别对应多条裂缝的“长度”“宽度”“深度”“发展性”“方向”和“密度”)评价指标的评价分值 γ_i 为 γ_{ij} ($j = 1, 2, 3$ 分别对应评价指标的分级)之和。例如:针对第 1 个评价指标(裂缝长度),多条裂缝中 $l < 5$ m 的裂缝占比为 i_{11} , $5 \text{ m} \leq l < 10$ m 的裂缝占比为 i_{12} , $l \geq 10$ m 的裂缝占比为 i_{13} , 参照评分等级对应的分值 h_{1j} 可得多条裂缝长度的评分 $\gamma_1 = \gamma_{11} + \gamma_{12} + \gamma_{13} = 6 \times i_{11} + 4 \times i_{12} + 2 \times i_{13}$ 。

建立多条裂缝健康状态参考值的公式的步骤为:每个指标的满分为 6 分;将每个评价指标的分值与满分 6 分之比再乘以权重,逐项累加即为多条裂缝健康状况的参考值 F_n 的最终得分,判别其健康状况。衬砌裂缝的指标在无法得到完整的各项参数时,设定默认值 $h_{1j} \sim h_{6j}$, 其中, h_{1j}, h_{2j}, h_{3j} 和 h_{5j} 的默认评分取 4 分, h_{4j} 和 h_{6j} 的默认评分取 3 分。

将多条裂缝中每条的长度 (l_1, l_2, \dots, l_n) 以 5 m 和 10 m 作为依据划分 3 个等级,统计多条裂缝长度 3 个区间的百分比,设定评价的总分为 6 分。长度的评分标准如表 10 所示。

表 10 隧道区间多条裂缝长度的评分标准

Table 10 Scoring standards for the length of multiple cracks in tunnel sections

评分标准	分值 h_{1j}	γ_{1j} (j 取值为 1, 2, 3)
$l < 5$ m 的裂缝占比 i_{11}	6	$6 \times i_{11}$
$5 \text{ m} \leq l < 10$ m 的裂缝占比 i_{12}	4	$4 \times i_{12}$
$l \geq 10$ m 的裂缝占比 i_{13}	2	$2 \times i_{13}$

将多条裂缝中每条的最大宽度 b_1, b_2, \dots, b_n , 以 0.2 mm 和 0.5 mm 作为依据划分 3 个等级,统计多条裂缝宽度 3 个区间的百分比,设定评价的总分为 6 分。宽度的评分标准如表 11 所示。

表 11 隧道区间多条裂缝宽度的评分标准

Table 11 Scoring criteria for the width of multiple cracks in tunnel sections

评分标准	分值 h_{2j}	γ_{2j} (j 取值为 1, 2, 3)
$b < 0.2$ mm 的裂缝占比 i_{21}	6	$6 \times i_{21}$
$0.2 \text{ mm} \leq b < 0.5$ mm 的裂缝占比 i_{22}	4	$4 \times i_{22}$
$b \geq 0.5$ mm 的裂缝占比 i_{23}	2	$2 \times i_{23}$

将多条裂缝中每条的最大深度 h_1, h_2, \dots, h_n , 以混凝土保护层厚度 c 的 1/3 值或 2/3 值或以默认值 1.5 mm 和 3 mm 作为依据划分 3 个等级,统计多条裂缝深度 3 个区间的百分比,设定评价的总分为 6 分。深度的评分标准如表 12 所示。

表 12 隧道区间多条裂缝深度的评分标准

Table 12 Scoring criteria for the depth of multiple cracks in the tunnel section

评分标准	分值 h_{3j}	γ_{3j} (j 取值为 1, 2, 3)
$h < \frac{1}{3}c$ 或 $h < 1.5$ mm 的裂缝占比 i_{31}	6	$6 \times i_{31}$
$\frac{1}{3}c \leq h < \frac{2}{3}c$ 或 $1.5 \text{ mm} \leq h < 3$ mm 的裂缝占比 i_{32}	4	$4 \times i_{32}$
$h \geq \frac{2}{3}c$ 或 $h \geq 3$ mm 的裂缝占比 i_{33}	2	$2 \times i_{33}$

将多条裂缝的发展性,以发展和不发展划分2个等级,统计多条裂缝发展和不发展的百分比,设定评价的总分为6分。发展性评分标准如表13所示。

表13 隧道区间多裂缝发展性的评分标准

Table 13 Scoring criteria for the development of multiple cracks

评分标准	分值 h_{4j}	γ_{4j} (j 取值为1, 2)
不发展的裂缝占比 i_{41}	6	$6 \times i_{41}$
发展的裂缝占比 i_{42}	3	$3 \times i_{42}$

将多条裂缝的方向角度定为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$,以 30° 和 60° 为依据划分3个等级,统计多条裂缝方向3个区间的百分比,设定评价的总分为6分。方向的评分标准如表14所示。

表14 隧道区间多裂缝方向的评分标准

Table 14 Scoring criteria for multiple crack directions in tunnel sections

评分标准	分值 h_{5j}	γ_{5j} (j 取值为1, 2, 3)
$\alpha \leq 30^\circ$ 的裂缝占比 i_{51}	6	$6 \times i_{51}$
$30^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ 的裂缝占比 i_{52}	4	$4 \times i_{52}$
$\alpha > 60^\circ$ 的裂缝占比 i_{53}	2	$2 \times i_{53}$

参照李明^[20],分布密度 P 描述裂缝在空间上的分布情况,反映了裂缝的集聚程度和密度,可以对裂缝的分布特征进行量化分析,从而更好地理解和研究裂缝的形成机制和演化规律。将多条裂缝的分布密度 P ,以 200 cm^2 为界限划分2个等级,并统计各自的占比,设定评价的总分为6分。密度的评分标准如表15所示。

表15 隧道区间多裂缝分布密度的评分标准

Table 15 Scoring criteria for the distribution density of multiple cracks in tunnel sections

评分标准	分值 h_{6j}	γ_{6j} (j 取值为1, 2)
$P < 200 \text{ cm}^2$ 的裂缝占比 i_{61}	6	$6 \times i_{61}$
$P \geq 200 \text{ cm}^2$ 的裂缝占比 i_{62}	3	$3 \times i_{62}$

3.2 隧道区间多裂缝病害量化诊断健康状态的参考值 F_n 的计算公式

类似于单裂缝,多裂缝健康状态的参考值 F_n 的分值计算公式为:
$$F_n = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j=1}^M \gamma_{ij}}{6} \cdot \omega_i$$
(M 为每项评价指标的等级数量, N 为评价指标的数量)。结合前文基于乘积标度法获得的隧道区间多裂缝病害评价指标分值及阈值的确定,隧道区间多裂缝病害健康状态的参考值计算公式简写为:
$$F_n = \frac{\gamma_{11} + \gamma_{12} + \gamma_{13}}{6} \times 0.202 + \frac{\gamma_{21} + \gamma_{22} + \gamma_{23}}{6} \times 0.202 + \frac{\gamma_{31} + \gamma_{32} + \gamma_{33}}{6} \times 0.149 + \frac{\gamma_{41} + \gamma_{42}}{6} \times 0.149 + \frac{\gamma_{51} + \gamma_{52} + \gamma_{53}}{6} \times 0.149 + \frac{\gamma_{61} + \gamma_{62}}{6} \times 0.149。$$

3.3 多裂缝病害健康状态的参考值 F_n 阈值的确定

单裂缝每一项评级指标的得分 γ_i 必定是评分标准中的分值,评价中可能出现的所有数组是可预知的;对于多条裂缝的安全评价方法,除了需要考虑单裂缝本身的评价指标分值,还需考虑同一评价指标同一分值的占比情况。因此,多裂缝病害健康状态的参考值阈值确定要复杂于单裂缝。

具体思路为:仿照单条裂缝健康状态参考值阈值确定方法,多裂缝评价指标的特征组合(即每个指标的统计占比分别为100%)共有324组。基于均匀分布概率统计思想,即假设每个特征组合的权重相同,对所有特征组合的健康状态参考值排序,假设健康状态分3个等级,故取排位位于1/3和2/3的 F_n 分别为0.6418和0.7412(阈值对应的多裂缝病害特征组合见表16)的值为健康状态的分界值(即阈值),因此,多条裂缝严重与一般组别分界线的数值为0.642,一般与轻微组别的分界值为0.741。

表16 多条裂缝阈值情况

Table 16 Multiple crack threshold situations

序号	长度得分	宽度得分	深度得分	发展性得分	方向得分	分布密度得分	F_n
1	2	6	4	6	6	3	0.741 2
2	2	6	6	3	4	6	0.741 2
3	4	4	4	3	6	6	0.741 2
4	4	4	4	3	2	6	0.641 8
5	4	4	2	3	4	6	0.641 8
6	4	4	4	6	2	3	0.641 8

结合现有养护规范及经验,基于多裂缝病害健康状态的养护措施建议如表17所示。

表17 多裂缝病害健康状态及养护建议

Table 17 Health status and maintenance suggestions for multi crack diseases

F_n 值	裂缝分类	养护建议
$0.383 < F_n \leq 0.642$	严重	及时修复治理
$0.642 < F_n \leq 0.741$	一般	重点观察,进行养护备案
$0.741 \leq F_n \leq 1$	轻微	正常养护

3.4 案例计算分析

针对小方山隧道现浇混凝土衬砌某区间使用裂缝识别程序对多张裂缝图片进行批量识别,得到裂缝统计情况如下:长度小于5 m的裂缝占全部裂缝的比例 i_{11} 为60%,大于等于5 m小于10 m占比 i_{12} 为20%,大于等于10 m的占比 i_{13} 为20%,因此该数组裂缝长度的分值 γ_1 为4.8(见表18)。同理,其他评价指标得分分别为:宽度得分 γ_2 为3.4分,深度得分 γ_3 为4.0分,发展性得分 γ_4 为5.1分,方向得分 γ_5 为4.2分及分布密度 γ_6 得分为3.6分。代入 F_n 公式中计算得到0.696,等级为一般,建议重点观察,进行养护备案。

表18 多条裂缝案例情况

Table 18 Case study of multiple cracks

评价指标	评价指标占比因子			评价指标分值
长度	$i_{11} = 60\%$	$i_{12} = 20\%$	$i_{13} = 20\%$	4.8
宽度	$i_{21} = 20\%$	$i_{22} = 30\%$	$i_{23} = 50\%$	3.4
深度	$i_{31} = 20\%$	$i_{32} = 60\%$	$i_{33} = 20\%$	4.0
发展性	$i_{41} = 70\%$	$i_{42} = 30\%$	—	5.1
方向	$i_{51} = 50\%$	$i_{52} = 10\%$	$i_{53} = 40\%$	4.2
分布密度	$i_{61} = 20\%$	$i_{62} = 80\%$	—	3.6

4 结 论

裂缝的智能识别和诊断是实现裂缝防治方案自动决策的核心技术,是目前隧道智慧养护领域研究热点和难点。引入乘积标度法和裂缝图像自动识别技术,结合规范要求,构建了一种基于乘积标度法的隧道衬砌结构裂缝病害定量自动识别和诊断方法,并结合案例分析验证了合理性,为实现隧道裂缝病害自动识别和养护方案自动决策提供了途径,得到如下主要结论:

1)结合单裂缝病害特点和隧道区间多裂缝病害特征,分别提出了基于乘积标度法的定量识别和诊断方法。单裂缝病害诊断方法以衬砌裂缝的长度、宽度作为主要评价指标,深度、方向、发展性作为辅助评价指标;多裂缝病害诊断方法以衬砌裂缝的长度、宽度作为主要评价指标,深度、方向、发展性和分布密度作为辅助评价指标;对评价方法的分值进行了系统的无量纲处理,指标阈值的确定既考虑了均匀分布函数概率分布

特性又结合了实际经验情况,更科学合理,易于推广应用。

2) 裂缝病害诊断方法中单个指标的评价权重与隧道结构的特点和环境有一定相关性,本方法结合规范中的规定进行定量评价,不能体现个体特性,如何根据隧道结构受力特点对评价方法中某些指标做相应修正,还需进一步探究。总体而言,所提出的裂缝病害智能识别和诊断方法可以对隧道裂缝病害进行自动识别和安全性评估,有效提升了诊断的效率,在隧道养护时能做到对精确位置“对症下药”。

参考文献

- [1] 罗鑫. 公路隧道健康状态诊断及系统的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Luo X. Study of diagnosis method and system for health condition of highway tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [2] 王华牢, 刘学增, 李宁, 等. 纵向裂缝隧道衬砌结构的安全评价与加固研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2651-2656.
Wang H L, Liu X Z, Li N, et al. Study on safety evaluation and reinforcement of lining structure of longitudinal crack tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2651-2656. (in Chinese)
- [3] 薛晓辉, 张军, 宿钟鸣, 等. 带裂缝隧道衬砌安全性评价及处治技术研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(1): 28-32.
Xue X H, Zhang J, Su Z M, et al. Safety evaluation and treatment technology of tunnel lining with cracks[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(1): 28-32. (in Chinese)
- [4] 周元德, 黄河啸, 张宇, 等. 从振动频谱角度探讨高铁隧道衬砌裂缝病害的安全评价[J]. 中国铁路, 2018(6): 5-9.
Zhou Y D, Huang H X, Zhang Y, et al. Research on safety evaluation of crack defect in HSR tunnel lining in terms of vibration frequency spectrum[J]. China Railway, 2018(6): 5-9. (in Chinese)
- [5] 蔡俊华. 基于扩展有限元法的带裂缝隧道衬砌的安全评价[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(12): 91-95, 101.
Cai J H. Safety evaluation of cracked tunnel lining based on extended finite element method[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36(12): 91-95, 101. (in Chinese)
- [6] 贺志勇, 钟宏武, 陈振华. 带裂缝隧道衬砌的安全评价及有限元分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 69-77.
He Z Y, Zhong H W, Chen Z H. Safety evaluation and finite element analysis of tunnel lining with cracks[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 69-77. (in Chinese)
- [7] 石钰锋, 彭斌, 祝志恒, 等. 隧道衬砌裂缝精细化识别及其评价[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2): 99-106, 145.
Shi Y F, Peng B, Zhu Z H, et al. Refined identification of tunnel lining cracks and its evaluation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(2): 99-106, 145. (in Chinese)
- [8] 徐向春. 污染场地地下结构服役性能演变规律及评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
Xu X C. Research on the performance and evaluation method of underground structures at contaminated sites[D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [9] 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, 34(3): 13-17.
He J P, Li Z Z, Shi Y Q. Weight question about comprehensive evaluating dam safety monitoring behavior[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, 34(3): 13-17. (in Chinese)
- [10] 胡群芳, 周博文, 王飞, 等. 基于模糊层次分析的公路隧道结构安全评估技术[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 41-49.
Hu Q F, Zhou B W, Wang F, et al. Structural safety assessment technology of long highway tunnel based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(4): 41-49. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道养护技术规范: JTG H12—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification of maintenance for highway tunnel: JTG H12—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [12] 福建省交通运输厅. 公路海底隧道土建结构养护技术规范: DB35/T 1941—2020[S]. 福建: 福建省市场监督管理局, 2020.
Fujian Provincial Department of Transportation. Technical code for maintenance of tunnel structure for highway submarine tunnel: DB35/T 1941—2020[S]. Fujian: Market Supervision Administration of Fujian Province, 2020. (in Chinese)
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通设施运营监测技术规范 第3部分: 隧道: GB/T 39559.3—

- 2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation of People's Republic of China, Standardization Administration of People's Republic of China. Specifications for operational monitoring of urban rail transit facilities: Part 3: Tunnel: GB/T 39559.3—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [14] 薛建锋. 板溪隧道二次衬砌裂缝扩展规律及安全性评价[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- Xue J F. Crack propagation law and safety evaluation of banxi tunnel secondary lining[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [15] 中国国家铁路集团有限公司. 铁路桥隧建筑物劣化评定 第2部分: 隧道: Q/CR 405.2—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
- RailwayChina. Assessment standard for structure deterioration of railway bridge and tunnel—Part 2: Tunnel: Q/CR 405.2—2019[S]. Beijing: China Railway Press, 2019. (in Chinese)
- [16] 宋兵辉. 南方公路隧道结构性健康诊断专家系统研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- Song B H. The south highway tunnel structure performance experts health diagnosis system development[D]. Nanning: Guangxi University, 2012. (in Chinese)
- [17] 杨新安, 黄宏伟. 隧道病害与防治[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
- Yang X A, Huang H W. Tunnel disaster prevention and treatment[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003. (in Chinese)
- [18] 张琳琳. 重大水工混凝土结构健康诊断综合分析理论和方法[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- Zhang L L. Comprehensive analysis theory and method of health diagnosis of large hydraulic engineering concrete structure[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese)
- [19] 杨启航. 隧道工程衬砌病害机理与评价方法研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- Yang Q H. Study on disease mechanism and evaluation method of tunnel engineering lining[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)
- [20] 李明. 山岭隧道与地下工程健康评价理论研究及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- Li M. Evaluation theory and application for health condition of tunnel and underground engineeri[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

(编辑 郑洁)