

一种基于图像的隧道表面裂缝波折程度量化参数获取算法

陈歌, 钟晨杰, 李志鹏*

同济大学电子与信息工程学院, 上海

收稿日期: 2024年1月25日; 录用日期: 2024年2月22日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

隧道衬砌表面裂缝的外部形态各异, 为了全面地量化隧道衬砌表面裂缝的不平整度, 本文提出了一种宏观与微观相结合多尺度量化波折程度的方法。该方法基于图像处理技术从采集图像中提取出裂缝轮廓曲线, 使用最小二乘法拟合轮廓中线, 自动提取出能反映裂缝宏观起伏的 α 参数和微观波折的 R_a 参数, 将两个裂缝轮廓曲线量化参数相结合实现对隧道裂缝波折程度的精准评估。实验结果表明, 这种宏观与微观相结合的方法能够有效量化裂缝的波折程度, 为进一步合理评估衬砌表面开裂情况提供客观依据。

关键词

隧道表面裂缝, 数字图像处理, 波折程度参数

An Algorithm for Quantifying the Degree of Waviness of Tunnel Surface Cracks Based on Image Analysis

Ge Chen, Chenjie Zhong, Zhipeng Li*

School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Jan. 25th, 2024; accepted: Feb. 22nd, 2024; published: Feb. 29th, 2024

Abstract

The external morphology of cracks on tunnel lining surfaces varies widely. To comprehensively quantify the irregularities of tunnel lining surface cracks, this paper proposes a multiscale method

*通讯作者。

文章引用: 陈歌, 钟晨杰, 李志鹏. 一种基于图像的隧道表面裂缝波折程度量化参数获取算法[J]. 计算机科学与应用, 2024, 14(2): 415-427. DOI: 10.12677/csa.2024.142042

that combines macroscopic and microscopic quantification of waviness. Based on image processing techniques, the method extracts crack contour curves from collected images, fits the central line of the contour using the least squares method, and automatically extracts parameters α reflecting the macroscopic undulation and R_a reflecting microscopic waviness. The combination of these two quantified parameters of crack contour curves enables precise evaluation of the degree of waviness in tunnel cracks. Experimental results demonstrate the effectiveness of this combined macroscopic and microscopic approach in quantifying the degree of waviness, providing an objective basis for a more rational assessment of the cracking situation on lining surfaces.

Keywords

Tunnel Surface Cracks, Digital Image Processing, Degree of Waviness Parameters

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市轨道交通以其速度快、污染小、能有效避免城市拥挤等优势在城市交通中占据着越来越重要的位置。自 1863 年英国伦敦建成世界上第一条大都会地铁起，世界上各个城市相继开通自己的轨道交通线路。截止到 2022 年底，我国城市轨道交通线路超过一万公里，其中地铁运营线路八千多公里。随着城市地铁运营线路不断增加，地铁隧道的检修和维护越发重要。

地下盾构隧道衬砌表面常见的结构病害有裂缝、混凝土剥落和渗漏水[1] [2]等。其中，隧道表面衬砌裂缝是最常见的病害之一[3] [4]。目前隧道表面裂缝的检测主要依赖人工巡检，效率低下且多为主观判断病害程度。为能对裂缝进行更精准的分析，许多研究人员基于采集的隧道表面图像陆续开展裂缝病害的量化研究。2006 年日本东京大学 Kiyoshi 教授[5]和他的团队在对地铁隧道病害进行分析之后，提出了裂缝走向、长度和宽度三个量化参数；刘海京等人结合隧道裂缝的位置和展布形态采用关键点提出裂缝的宽度、深度、相对错动距离和张开状态等参数[6]，通过地质雷达等工具为进一步分析隧道承载特征奠定了基础；2011 年，成盛等提出裂缝面积，分形维数，长度和宽度对混凝土早期裂缝的不规则性进行描述[7]；张素磊[8]等人将裂缝密度和裂缝类型这两个参数加入到裂缝的量化参数中，并对不同位置组合关系及不同深度的衬砌裂缝进行断裂参数计算；2017 年，Wu 等提出用分形维数来表征裂缝的密度、宽度和分布集中度，并指出裂缝的交集和分形尺寸呈正相关，交集增大会增加衬砌倒塌的风险[9]。同年，Wu 等根据地震仪的振动测量结果分析提出裂纹指标 F_0 与隧道衬砌振动的相关性，用于评价隧道衬砌整体的稳定性[10]。2022 年，邵珠山等对衬砌的裂缝病害机理进行进一步的划分[11]，根据隧道表面受力机理和裂口特征，将裂缝走向进一步的划分为环向、纵向和斜向裂缝，并依据裂缝出现的位置和宽度总结了不同的裂缝治理机制。

由于地下压力、温度和沉降等都会引起隧道衬砌表面管片的开裂，衬砌结构的受力不同、承载能力不同，其产生的裂缝形状也会不同。多变且不规则的裂缝形态，能反映衬砌表面复杂的受力情况。通过观察裂缝的形态特征，检修人员能够估计目前衬砌结构的安全程度。裂缝在数字图像中呈现不规则曲线的形态，其波折程度能直观的反映开裂周围应力强度分布等力学特性。裂缝波折程度增大，会增加开裂面的上下接触面积和摩擦阻力，从而提高剪切强度直接影响裂缝向管片内扩展的速度[12]。当隧道衬砌表

面管片中出现贯穿性裂缝时，裂缝的波折程度会影响地下水的渗漏速率[13]。

隧道表面裂缝波折程度作为一个能够反映裂缝重要特性的量化参数，目前相关的研究较少。为了更精准地描述隧道表面裂缝的形态特征，本文提出可用于量化裂缝波折程度的参数，客观地描述裂缝的形态特征。结合图像处理技术，基于隧道表面数字图像自动提取出能量化裂缝宏观和微观波折程度的参数。通过综合分析裂缝轮廓曲线的微观偏差波折度和宏观起伏波折度，为进一步合理评估衬砌开裂情况提供依据。

2. 常见经典轮廓曲线波折程度量化参数

2.1. 经典轮廓曲线波折程度量化参数

目前尚未有能够表征隧道衬砌表面裂缝波折程度的量化参数，但是已有不少领域通过计算轮廓曲线的波折程度反映物体的受力状态。1977年 Barton 最早提出 10 条标准轮廓曲线并命名为 Barton 经典剖面线[14]，如图 1 所示。研究人为认定 10 条标准剖面线的波折程度依次增大，剖面线所对应节理面的抗剪强度也增大。通过研究人员的主观对比确定不规则剖面曲线的波折程度，这种办法在实际应用中缺少客观性。

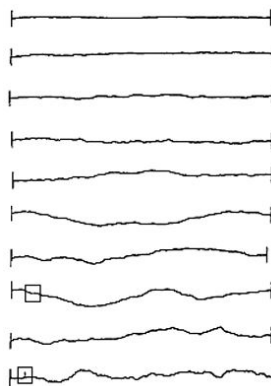


Figure 1. Barton's ten standard profile lines [14]

图 1. Barton 十条标准剖面线[14]

为避免主观判断，Tse 等人基于上述剖面线提出了轮廓曲线波折程度和面粗糙度之间的经验公式[15]。通过计算岩石表面轮廓曲线的一阶导数均方根 Z_2 得到相对应的节理表面粗糙度系数(JRC, Joint Roughness Coefficient):

$$\text{JRC} = 32.2 + 32.47 \lg(Z_2) \quad (1)$$

式(1)中，

$$Z_2 = \frac{1}{L} \sqrt{\int_{x=0}^{x=L} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} = \left[\frac{1}{M(\Delta x)^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(2)中， M 是轮廓曲线测量点数， L 是轮廓曲线的投影长度， Δx 为每两个测量点之间沿投影方向的取样长度， $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ 为相邻两测量点之间的高度差。经过大量实验将 JRC 的合理取值区间定为[0, 20]，在该合理区间内 JRC 与表面轮廓曲线的波折程度呈正相关。

S.M.EL 等[16]在研究混凝土表面曲线波折程度时提出了用于混凝土表面轮廓的粗糙指数 R_p ，甘磊等人[17]在后续研究中通过统计 220 条轮廓曲线的特征参数构建了 R_p 与混凝土轮廓曲线波折程度之间的关系式为：

$$\begin{cases} R_p = \frac{L_t}{L} \\ L_t = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \\ L = \sum_{i=1}^{N-1} (x_{i+1} - x_i) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, L_t 为轮廓曲线实际长度; L 为轮廓曲线归一化长度; N 为轮廓曲线测量点数, $x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}$ 分别为第 i 个和第 $i+1$ 个采样点的横纵坐标。大量的基于混凝土表面曲线的实验表明, R_p [1, 1.7]在区间内时轮廓曲线的波折程度会随着 R_p 数值的增大而增大。

2.2. 经典轮廓曲线波折程度量化参数适用性分析

为验证常用于表征经典轮廓曲线波折程度的量化参数在裂缝上是否适用, 在对隧道表面裂缝图像进行数字化流程处理之后, 本节首先采用 JRC 经典公式计算隧道表面裂缝的波折程度。为精准描述裂缝形状且不遗漏关键的像素点, 首先对原始裂缝进行提取骨架处理。在计算裂缝轮廓曲线的一阶导数均方根 Z_2 时, 采用 Tse 研究中建议的 1.27 mm 曲线采样间隔, 采用式(1)计算 200 张裂缝样本的波折程度, 得到裂缝的 JRC 值分布如图 2 所示。

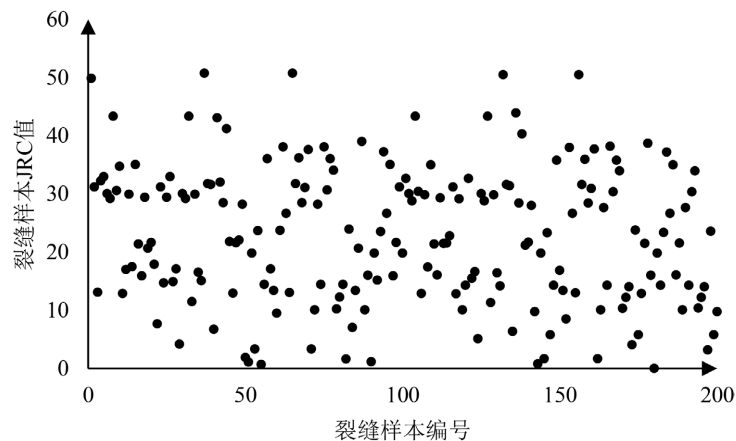
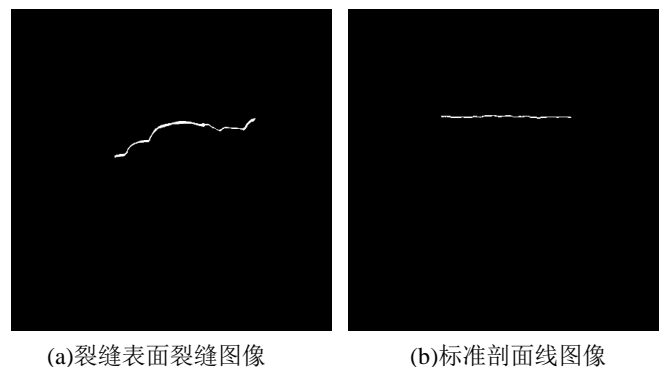


Figure 2. JRC value of tunnel surface crack

图 2. 隧道表面裂缝的 JRC 值



(a)裂缝表面裂缝图像

(b)标准剖面线图像

Figure 3. Comparison between tunnel surface crack images and standard profile line images

图 3. 隧道表面裂缝图像与标准剖面线图像对比

通过对裂缝样本实验结果进行详细分析, 得到隧道裂缝轮廓曲线的 JRC 均值为 22.78, 该数值显然偏离了 JRC 合理取值范围[0, 20]。对该量化参数在本实验对象中的适用性进行进一步探讨, 分析实验结果认为原 JRC 经验公式是 Barton 经过大量实验提出的, 实践中采样间距过大使得轮廓线上的一些粗糙特征易被忽略, 从而导致结果有偏差。此外, 混凝土是一种由水泥、砂和石子等按照一定比例混合而成的人造材料。这种人造材料与岩石表面的结构形态相比存在较大差异, 导致隧道混凝土表面轮廓曲线的波折程度明显大于岩石节理面轮廓曲线的波折程度, 影响该参数的适用性, 如图 3 所示。

为了研究轮廓粗糙指数在量化混凝土表面轮廓曲线波折程度上的适用性, 本节中采用 R_p 值来分析比较不同裂缝轮廓曲线的波折程度。对于本文中研究的裂缝图像, 轮廓曲线的粗糙度 R_p 可定义为裂缝骨架曲线的粗糙度。通过遍历经过骨架处理后的裂缝样本轮廓曲线, 获取轮廓曲线的实际长度 L_t 。由于隧道表面裂缝走向不定, 分析比较各样本裂缝轮廓线, 通过最小二乘法拟合得到轮廓最小二乘中线视其为轮廓基准线。计算裂缝实际长度与归一化长度的比值, 得到用于描述裂缝波折程度的轮廓粗糙指数。采用式(3)计算 200 张裂缝样本的 R_p 值, 统计结果如图 4 所示。

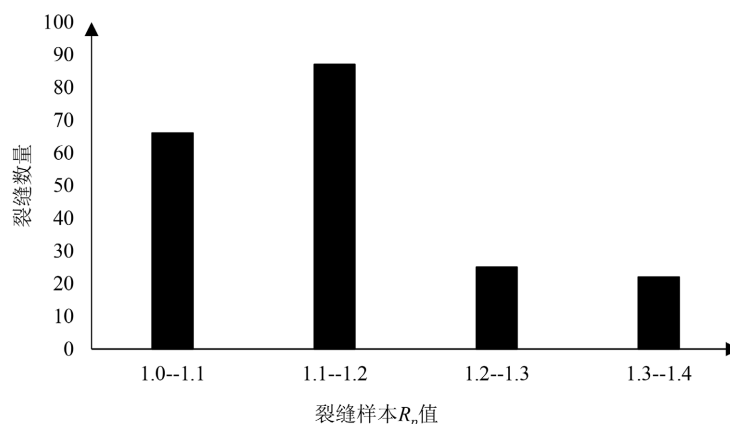


Figure 4. Tunnel surface crack R_p statistics

图 4. 隧道表面裂缝 R_p 统计值

通过对大量样本的处理分析发现, R_p 在一定程度上能够区分部分裂缝骨架曲线的波折程度, 但其区分度并不显著。由于裂缝本身存在自相似性, 80% 裂缝样本的 R_p 数值分布在 1.00~1.30 之间。这种集中在小数点后两位的区分度过小, 易产生误差。观察图 5(a)和图 5(b)中的两条裂缝, 其 R_p 相差不大, 但图 5(b)中裂缝的局部微小波折略多于图 5(a)。而图 5(a)中裂缝的轮廓曲线局部较为光滑, 总体起伏较大。因此, R_p 对本文研究的裂缝波折程度量化精度不足, 裂缝波折程度的量化需要更为全面和准确的量化参数。

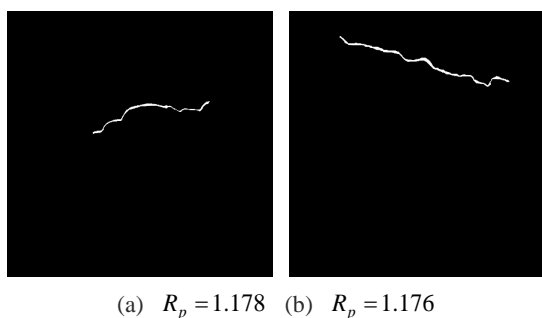


Figure 5. Comparison of R_p values for different cracks on the tunnel surface

图 5. 不同隧道表面裂缝的 R_p 值对比

3. 隧道裂缝波折程度量化参数研究

通过实验分析表明,常用于反映轮廓曲线波折程度的 JRC 和 R_p 参数都不适用于描述隧道表面裂缝的波折程度。由于隧道表面裂缝的形状多变,本文将样本中裂缝轮廓曲线的波折程度分为趋势性宏观起伏波折和微观偏差波折两个参数,综合分析表现裂缝的不平整度。

3.1. 隧道裂缝波折程度量化参数定义

3.1.1. 宏观起伏度

由于隧道衬砌面的内部开裂与裂缝轮廓曲线上波峰点被挤压有关,因此轮廓曲线的起伏程度会影响衬砌内部开裂剪切强度。本节所提轮廓曲线的波峰波谷,是用于描述整条曲线不平整度的宏观概念。通过观察样本中的裂缝轮廓曲线形状,由于曲线长度的差异,本文采用轮廓曲线上测量点到中线的最大距离 h_{\max} 与波峰到波谷的最大高度差 h 之间的比值,来描述隧道表面裂缝的宏观起伏程度 α ,如图 6 所示。宏观起伏程度 α 的表达式为:

$$\alpha = \frac{h_{\max}}{h} \quad (4)$$

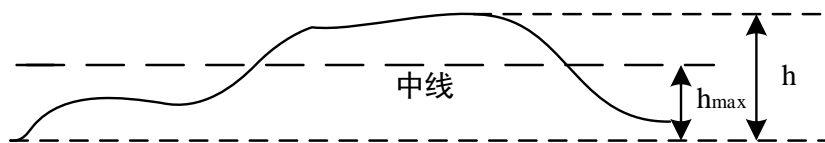


Figure 6. Tunnel surface crack macroscopic fluctuation α
图 6. 隧道表面裂缝宏观起伏度 α

3.1.2. 微观偏差波折程度

微小凸峰和凹谷组成的高低起伏是构成隧道衬砌表面裂缝形状的主要特征,本文提出微观偏差波折程度 R_a 表征局部峰谷的不平整。微观偏差波折程度 R_a 定义为在一定的取样长度内,裂缝轮廓曲线上各个像素点到轮廓中线距离绝对值的平均值,如图 7 所示。该计算方法涉及裂缝轮廓曲线的每一个像素点,定义公式

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (5)$$

由于数字图像中像素点是离散分布的,在实际计算中采用式(8)进行计算

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (6)$$

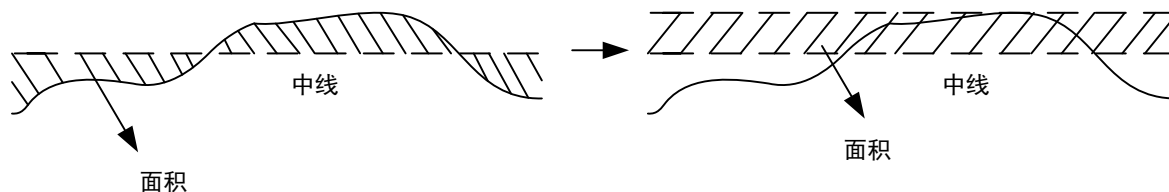


Figure 7. Schematic diagram of R_a values for cracks on the tunnel surface
图 7. 隧道表面裂缝 R_a 值示意图

3.2. 隧道裂缝波折程度参数计算

3.2.1. 隧道表面裂缝图像预处理

本文所用裂缝样本图采集于某城市地铁盾构隧道，裂缝样本图像分辨率为 0.2 mm。在隧道实际图像采集的过程中，由于隧道条件昏暗且隧道衬砌背景复杂，采集所得图像很可能出现裂缝信息和其他背景信息难以区分的情况。为能精准量化裂缝波折程度，本文先使用的是隧道表面裂缝的二值图像。裂缝本身应是沿着中心线方向也就是骨架扩展的，为精确的计算裂缝微观偏差波折程度，需要对隧道表面裂缝进行提取骨架处理。本文基于 Zhang 提出的快速迭代细化算法对裂缝图像进行骨架提取[18]，消除非单一像素宽度的像素点获得精准的裂缝骨架即裂缝轮廓曲线，如图 8 所示。

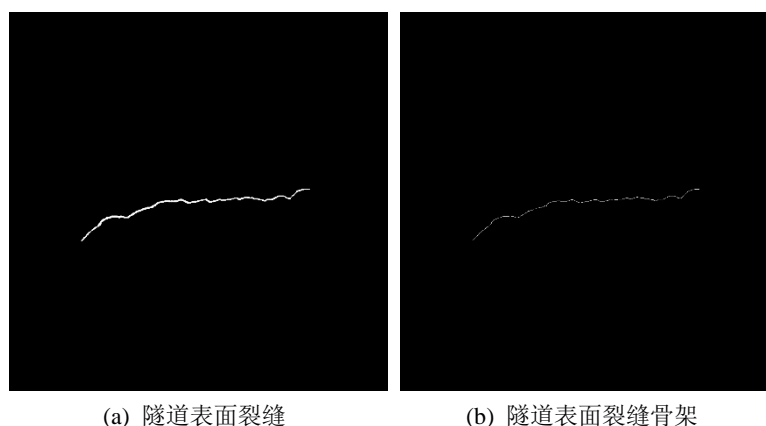


Figure 8. Extraction of crack skeleton on the tunnel surface.
图 8. 隧道表面裂缝骨架提取

3.2.2. 隧道表面裂缝图像波折程度参数计算

隧道表面裂缝轮廓曲线处于衬砌表面的不同位置且走向各异，为避免方向的影响，需要为裂缝轮廓选取合理的轮廓基准线。轮廓基准线分为轮廓坐标点的算数平均值中线和轮廓的最小二乘中线两种。根据实际的样本轮廓曲线进行计算，发现两种方法计算出来的中线相差很小。如图 9 所示，本文选用轮廓最小二乘中线为轮廓中线，在取样长度内使得轮廓曲线上各个测量点至中线的距离平方和最小， d_i 为裂缝曲线 $f(x_i, y_i)$ 上各测量点到最小二乘中线 $g(x_i, y_i)$ 的距离，表达式为：

$$d_i = |f(x_i, y_i) - g(x_i, y_i)| \quad (7)$$

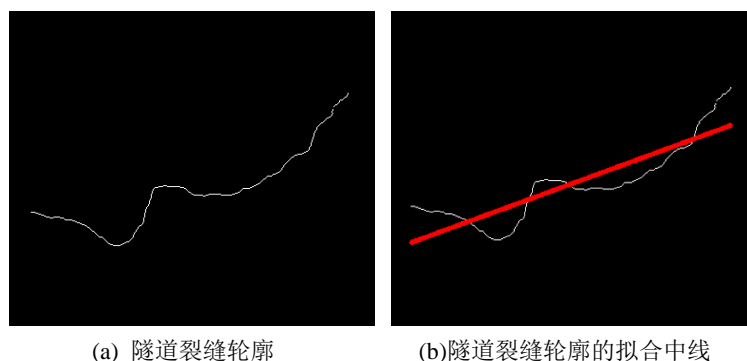


Figure 9. Contour centerline of tunnel cracks
图 9. 隧道裂缝的轮廓中线

由式(4)可知, 宏观起伏度与轮廓曲线上测量点到中线的最大距离 h_{\max} 和波峰到波谷的最大高度差 h 有关。为了自动提取出宏观起伏度参数 α , 首先使用最小二乘中线法拟合出裂缝轮廓的中线 l_0 , 通过遍历图像中裂缝轮廓曲线的每一个像素测量点 (x_0, y_0) , 利用点到直线的距离公式 $d = \left| \frac{Ax_0 + By_0 + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right|$ 计算得到像素点 (x_0, y_0) 到裂缝轮廓中线 l_0 的距离。在横坐标相等的情况下, 比较测量点与裂缝轮廓中线上像素点的纵坐标, 判断测量点位于轮廓中线的上侧或下侧。在遍历过程中, 记录位于轮廓中线上侧的测量点最大距离 h_A 和位于轮廓中线下侧的测量点最大距离 h_B , 波峰到波谷的最大高度差即为 $h = h_A + h_B$ 。轮廓曲线上测量点到中线的最大距离 h_{\max} 为 h_A 、 h_B 两者中的较大值。

在计算轮廓曲线的局部波折程度时, 为避免宏观形状对波折程度量化产生影响, 将量化轮廓曲线的微小不平限制在一段相对于整条轮廓曲线长度足够短的取样长度 l_r 内。由于隧道表面裂缝长度不一, 不同的取样长度 l_r 会导致计算结果 R_a 有所差别。由于隧道表面裂缝数字图像是二维离散的, 首先对裂缝进行分段处理, 通过最小二乘中线法拟合出水平长度为 l_r 的 n 段裂缝轮廓中线。在每一段裂缝轮廓曲线内, 逐个遍历像素点计算点到直线的距离并进行累加, 得到该段内像素点到轮廓中线的总距离 R_i 。如图 10 所示, 通过取样长度 l_r 将裂缝分段, 在每段裂缝内拟合各自的裂缝轮廓中线 R_1 或者 R_2 。对 n 段取样长度内的轮廓测量点到中线的距离总和求均值, 认定这个均值为隧道表面裂缝的微观偏差波折程度 R_a 。计算裂缝微观偏差波折程度 R_a 的表达式为:

$$\begin{cases} R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \\ R_i = \sum_{j=1}^m d_j = \sum_{j=1}^m \left| \frac{Ax_j + By_j + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right| \end{cases} \quad (8)$$

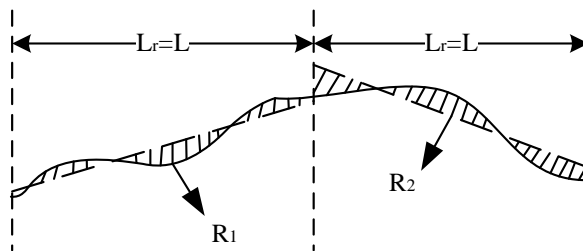


Figure 10. Schematic diagram of fracture sampling length selection
图 10. 裂缝取样长度选取示意图

对于基准线较短的轮廓曲线来说, 取样长度过大会导致 $l_r \approx l$, 其局部波折程度就等于宏观的起伏程度, 计算结果误差较大, 如图 11 所示。而取样长度过小则可能导致各个样本之间的轮廓曲线局部波折程度缺乏区分度, 如图 12 所示。通过分析本样本集的裂缝特征, 认为将取样长度 l_r 限制在 10 mm 是较为合理的取值。



Figure 11. Diagram of crack sampling length over a long period
图 11. 裂缝取样长度过长时示意图

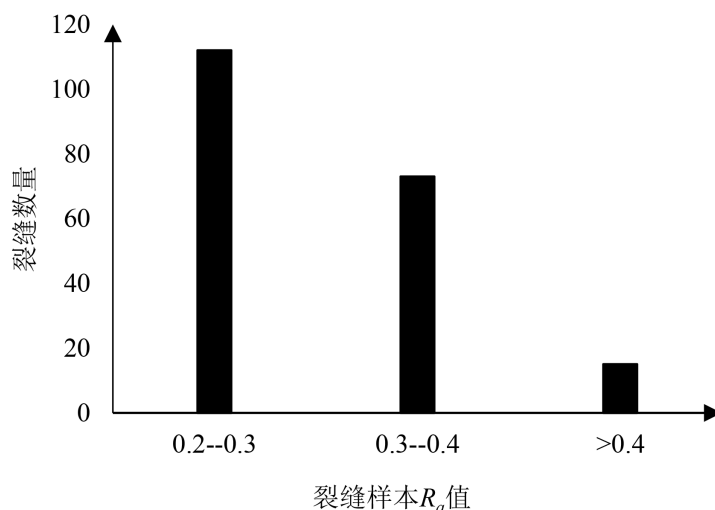


Figure 12. Sampling length is too short fracture sample R_a statistics
图 12. 取样长度过短时裂缝样本 R_a 统计值

4. 隧道裂缝波折程度量化参数适用性分析

为验证本文提出的量化裂缝波折程度参数，本节对采集的 200 张隧道裂缝样本的宏观起伏度进行计算。通过对量化参数结果进行分析，验证本文提出的量化参数是否能够准确反映裂缝的整体波折程度。图 13 的统计结果显示，该参数在不同的裂缝曲线中有明显的区分度。裂缝轮廓曲线样本的宏观起伏度均值为 0.567，其中宏观起伏度在 0.65 以上的裂缝占据了总样本的 10%。通过观察裂缝形态，认为这一类裂缝轮廓曲线在整体上呈现出较大的起伏度。

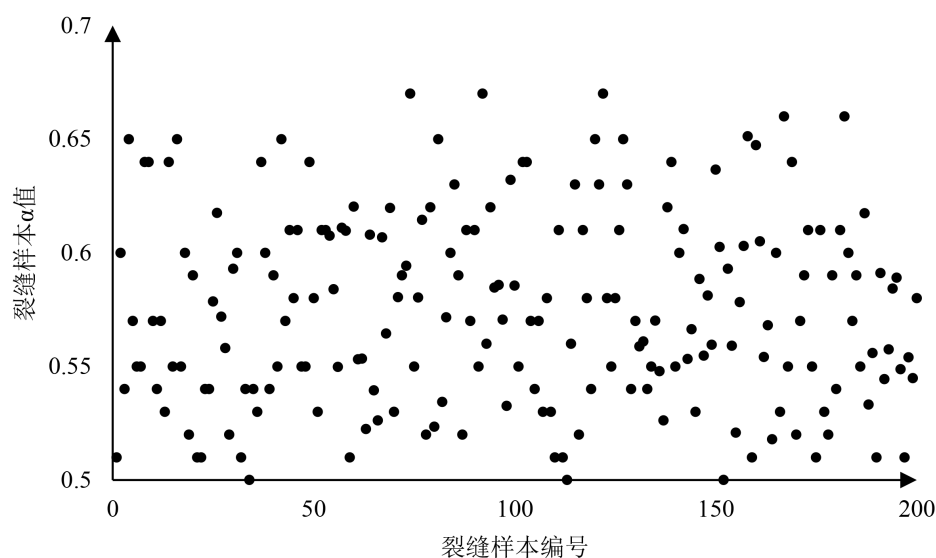


Figure 13. Statistical values of macroscopic undulation for tunnel crack samples
图 13. 隧道裂缝样本宏观起伏度统计值

图 14 中展现了两条裂缝，图 14(a)中裂缝的宏观起伏度为 0.54，而图 14(b)中裂缝的宏观起伏度为 0.65。通过对比这两条裂缝轮廓曲线，图 14(a)中裂缝的宏观起伏度明显小于图 14(b)中裂缝的宏观起伏度。实验结果表明宏观起伏度 α 值能够合理表征裂缝的整体波折程度，即 α 值越大，裂缝整体的波折程度越大。

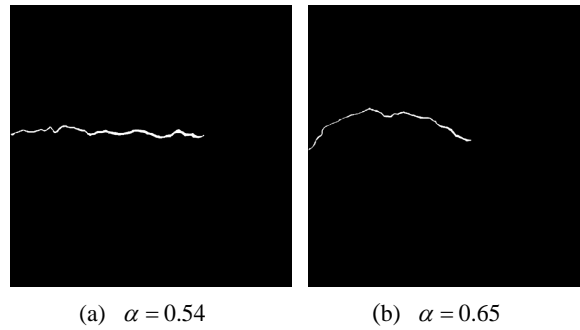


Figure 14. Crack images with different macroscopic undulations
图 14. 不同宏观起伏度的裂缝图像

在式(9)中，本文采用了结合分段处理和最小二乘中线法的方法，以更准确地描述隧道表面裂缝的微观波折程度。通过选定的 10 mm 取样间隔，并通过最小二乘法拟合得到的基准线，计算了 200 条裂缝的轮廓平均偏差 R_a 值，具体结果如图 15 所示。通过对大量样本进行统计参数的分析，隧道表面裂缝轮廓曲线 R_a 值绝大部分分布在 0.4~2.2 之间。观察图像可以发现，所提出的参数在不同裂缝之间具有明显的区分度。不同裂缝的形状不同，局部波折程度不同，分段计算得到的 R_a 值也不同。

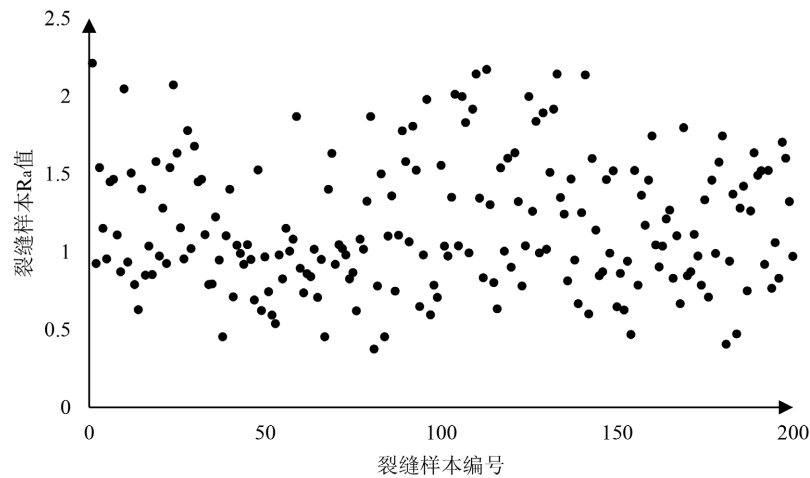


Figure 15. Statistical values of R_a for tunnel crack samples with a sampling interval of 10 mm
图 15. 取样间隔 10 mm 时隧道裂缝样本 R_a 统计值

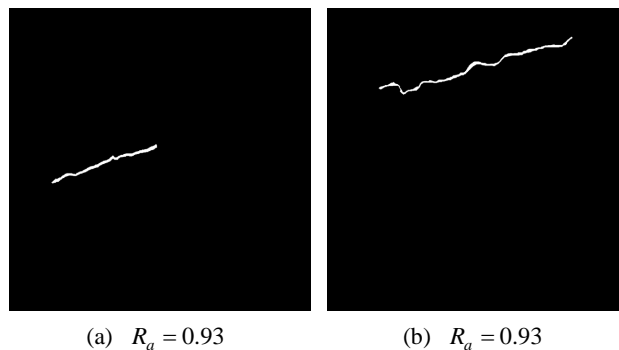


Figure 16. Display of crack images with different microscopic deviation undulation degrees
图 16. 不同微观偏差波折度的裂缝图像展示

图 16 中展示了两条微观波折程度不同的隧道表面裂缝，其中图 16(a)中裂缝 R_a 值为 0.93，图 16(b)中 R_a 值为 1.57。对比这两条裂缝的形状，观察到图 16(a)中裂缝的轮廓曲线局部波折明显少于图 16(b)中裂缝。实验结果表明，微观偏差值能够合理表征裂缝的局部波折程度，即 R_a 值越大，裂缝局部越波折。

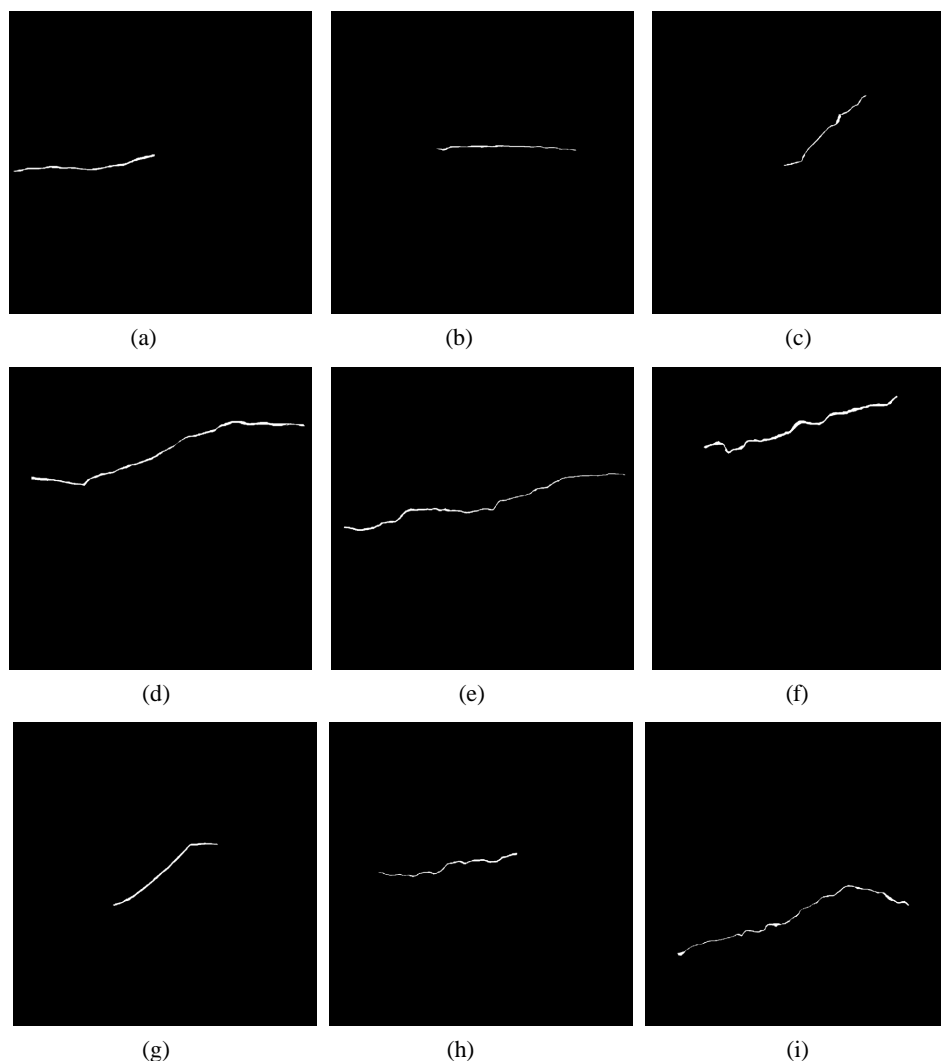


Figure 17. Images of cracks with different degrees of flexural deformation

图 17. 波折程度不同的裂缝图像

为更直观地展示所提量化参数对裂缝波折程度的量化效果，图 17 中展示了波折程度不同的裂缝图像，表 1 中给出了这些裂缝的不同量化参数计算结果。图 17 中共展示了 9 张裂缝图像，其中图 17(a)、图 17(b)和图 17(c)中裂缝的轮廓粗糙指数 R_p 值相差不大，但是裂缝的微观偏差参数中能明显看出图 17(c)的局部波折程度高于前两张图。图 17(d)、图 17(e)和图 17(f)中裂缝的轮廓粗糙指数 R_p 值非常相近，而图 17(d)中裂缝的局部波折程度明显比图 17(f)中裂缝的局部波折程度高。通过观察微观偏差波折程度 R_a ，能够发现这三条裂缝在局部波折程度上的差异。图 17(g)和图 17(i)中的 R_p 差值约为 0.01，通过比较裂缝的宏观起伏参数和微观偏差参数，能更清楚地判定图 17(g)中裂缝的整体起伏较大，而图 17(i)中裂缝的局部波折程度较大。

当裂缝的 R_p 值差不多相等不具备区分度时，各个裂缝之间的宏观起伏度 α 和微观波折程度 R_a 有显著差异。因此，隧道表面裂缝图像的波折程度应该由宏观起伏度指标 α 和微观偏差波折程度 R_a 共同

衡量。在其他量化参数失效时，宏观起伏度指标 α 和微观偏差波折程度 R_a 仍能用来量化裂缝轮廓曲线整体的起伏程度和其局部波折特征。隧道表面裂缝作为衬砌内部开裂面的一条轮廓曲线，其波折程度的增大能显著提高接触面的峰值剪切强度，精准量化隧道裂缝的波折程度能为后续研究提供更多依据。

Table 1. Quantitative parameters for the flexural deformation of different crack contour curves.

表 1. 不同裂缝轮廓曲线的波折程度量化参数

图像	R_p	α	R_a
(a)	1.0470	0.5254	0.4530
(b)	1.0464	0.5204	0.5932
(c)	1.0563	0.5348	0.9033
(d)	1.0901	0.5964	0.7912
(e)	1.0927	0.5677	1.104
(f)	1.0933	0.5517	1.2513
(g)	1.2242	0.6120	0.4543
(h)	1.1234	0.5419	1.0551
(i)	1.1467	0.6119	1.3232

5. 结论

本文以隧道衬砌表面裂缝图像作为研究对象，结合隧道工程专业知识并基于数字图像处理技术，提出可用于量化裂缝波折程度的参数并设计了相应的参数自动提取算法。根据实验结果对该参数进行了初步分析。得出以下主要结论：

- 1) 本文结合图像处理技术，采用骨架提取算法获得了裂缝的单像素轮廓曲线。通过最小二乘法拟合裂缝轮廓中线，利用裂缝的骨架和基准线为后续计算隧道裂缝波折程度奠定了数据基础。
- 2) 对大量样本进行实验分析，探究裂缝轮廓曲线 JRC 参数和混凝土轮廓曲线 R_p 参数在量化裂缝波折程度上的适用性。
- 3) 本文提出了宏观起伏度 α 和微观偏差波折程度 R_a 两个量化参数，并详细分析了其与隧道裂缝波折程度之间的联系。通过运用 α 和 R_a 这两个量化参数，实现了多尺度衡量隧道表面裂缝轮廓曲线的波折程度。通过大量的实验证明，这种综合考量能弥补单一参数在描述裂缝特性时的不足，有效反映裂缝的波折程度，为后续评估衬砌开裂面的粗糙度提供依据。

基金项目

这项工作得到了国家自然科学基金的资助，资助号为 61773290。

参考文献

- [1] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析[J]. 地下工程与隧道, 2009, 75(1): 1-6+52.
- [2] 黄聪, 陈伟杰, 苏栋, 等. 地铁隧道结构病害成因分析及故障树模型综述[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 264-272.
- [3] 杨启航. 隧道工程衬砌病害机理与评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [4] 黑焕学. 城市轨道交通运营隧道病害辨识与结构健康状态评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [5] Yoshiyuki, S., Toshiyuki, T., Katsumi, K., *et al.* (2006) Propose of Tunnel Crack Index (TCI) as an Evaluation Method

- for Lining Concrete. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser F1*, **62**, 628-632. <https://doi.org/10.2208/jscejf.62.628>
- [6] 刘海京. 公路隧道健康诊断计算模型研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [7] 成盛, 金南国, 田野, 等. 混凝土裂缝特征参数的图形化定量分析新方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2011, 45(6): 1062-1066.
- [8] 张素磊. 隧道衬砌结构健康诊断及技术状况评定研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [9] Wu, X., Jiang, Y., Wang, J., Masaya, K., Taniguchi, T. and Yamato, T. (2017) A New Health Assessment Index of Tunnel Lining Based on the Digital Inspection of Surface Cracks. *Applied Sciences*, **7**, Article 507. <https://doi.org/10.3390/app7050507>
- [10] Wu, X., Jiang, Y., Masaya, K., *et al.* (2017) Study on the Correlation of Vibration Properties and Crack Index in the Health Assessment of Tunnel Lining. *Shock and Vibration*, **2017**, Article ID: 8135120. <https://doi.org/10.1155/2017/8135120>
- [11] 邵珠山, 席慧慧, 乔汝佳, 等. 运营隧道衬砌裂损与治理修复措施研究综述[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(4): 29-39.
- [12] Wang, C., Elsworth, D., Fang, Y., *et al.* (2020) Influence of Fracture Roughness on Shear Strength, Slip Stability and Permeability: A Mechanistic Analysis by Three-Dimensional Digital Rock Modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **12**, 720-731. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.12.010>
- [13] 黄宏伟, 刘德军, 薛亚东, 等. 基于扩展有限元的隧道衬砌裂缝开裂数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(2): 266-275.
- [14] Barton, N. (1971) A Relationship between Joint Roughness and Joint Shear Strength. *Rock Fracture Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, Nancy, 4-6 October 1971, 1-8.
- [15] Tse, R. (1979) Estimating Joint Roughness Coefficients. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **16**, 303-307. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(79\)90241-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)90241-9)
- [16] Tatone, B. and Grasselli, G. (2010) A New 2D Discontinuity Roughness Parameter and Its Correlation with JRC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **47**, 1391-1400. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.006>
- [17] 甘磊, 马洪影, 沈振中. 混凝土粗糙面形貌特征参数与节理粗糙度系数关系研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(7): 57-65.
- [18] Zhang, T.Y. and Suen, C.Y. (1984) A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns. *Communications of the ACM*, **27**, 236-239. <https://doi.org/10.1145/357994.358023>