

基于巡检图像的隧道衬砌裂缝智能检测与分级研究

郝良超

山东科技大学 山东 青岛 266590

【摘要】：隧道衬砌裂缝直接关系结构安全与耐久性能，基于巡检图像的智能检测与分级技术有效提升了裂缝识别的效率与准确率。通过高分辨率图像采集设备、深度学习模型及分级评估机制，实现了裂缝特征的精准提取与严重程度自动判断。系统在多类隧道工程中完成应用验证，表现出良好的鲁棒性与扩展性，为隧道运维管理提供了智能化解决方案。

【关键词】：隧道衬砌裂缝；巡检图像；智能检测；裂缝分级；深度学习

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.055

引言

隧道衬砌结构长期处于复杂受力与环境变化之中，裂缝作为其主要病害形式，对结构安全与耐久性构成潜在威胁。传统依赖人工巡检的方式存在效率低、识别精度不稳定等问题，难以满足现代隧道养护的信息化与智能化需求。借助图像采集设备与深度学习算法构建的智能检测系统，可实现裂缝特征的高效提取与自动分级判定，提升隧道病害识别的时效性与准确性，为隧道结构安全管控提供技术支撑。

1 隧道衬砌裂缝的常见类型及成因机制分析

1.1 典型衬砌裂缝的空间形态与发展演化特征

隧道衬砌裂缝在空间形态上表现多样，主要包括纵向裂缝、横向裂缝、斜裂缝及网状裂缝等类型。其中，纵向裂缝常沿隧道轴线方向分布，多与地层沉降或围岩压力不均有关；横向裂缝则多集中于衬砌接缝或施工缝处，常由温度应力或沉降差引起；斜裂缝则往往出现在洞口段或地质突变区域，是应力重分布的结果；网状裂缝通常出现在喷锚初期支护层，常与材料收缩和早期干燥有关。裂缝的起始往往是由微小裂隙扩展而成，随着服役时间延长及环境荷载变化，裂缝会沿结构薄弱部位逐步扩展并互相贯通，进而影响衬砌整体的受力性能和耐久性。

1.2 地质环境与施工工艺对裂缝形成的影响因素

地质条件的复杂性直接影响衬砌结构的受力状态，是裂缝形成的重要诱因之一。软弱围岩、断层破碎带及地下水丰富区域，常导致隧道围岩变形不均，引发衬砌受压失稳而产生裂缝。施工工艺中的开挖方法、衬砌施工工序及初期支护的时效性等因素也对裂缝的产生有显著影响^[1]。采用爆破开挖时若控制不当，易引发局部围岩扰动加剧，导致支护失效并诱发裂缝；喷锚支护与二次衬砌之间若存在时间延迟或粘结不良，极易在接缝处形成应力集中，引发开裂。衬砌厚度不均、养护不到位或模板变形等施工缺陷，亦会造成裂缝沿施工弱面扩展。

1.3 长期服役条件下裂缝扩展的动力学演变规律

隧道在服役期间受到地应力、温湿度变化及交通荷载等多种因素的长期叠加作用，裂缝扩展呈现出渐进式的发展规律。初期微裂纹在反复荷载作用下发生疲劳损伤积累，裂缝扩展速率缓慢；进入稳定期后，裂缝增长速度加快，常表现为周期性扩展与突发性跃增交替出现。湿度变化引起的衬砌混凝土干湿循环，加速了裂缝边缘材料的疲劳劣化，尤其在渗水作用下，结构内钢筋锈蚀进一步促使裂缝扩展和贯通。温度梯度造成的热胀冷缩效应在季节交替时更为显著，对裂缝宽度变化起到周期性激发作用，促使裂缝从表层向深层发展，最终形成穿透性损伤结构。

2 巡检图像采集方式与数据处理流程构建

2.1 移动巡检设备与图像采集系统的配置参数设计

隧道巡检作业对设备稳定性与图像采集精度要求较高，移动平台需具备抗震性强、自主导航和多传感协同能力。轨道式巡检车和履带式机器人在实际应用中表现出良好的适应性，可根据隧道断面灵活部署。图像采集系统通常搭载高分辨率工业相机，分辨率一般不低于 4K，以满足微小裂缝识别需求。镜头焦距、视场角与隧道距离保持合理匹配，避免图像畸变。为减少运动模糊，快门速度需根据巡检速度同步调整，并结合稳定补光装置提升成像清晰度。系统集成激光测距仪和 IMU 装置，实现图像与空间位置信息的精准同步，为后续识别与定位提供基础数据保障。

2.2 图像清晰度与光照条件对裂缝识别精度的影响

裂缝识别的准确性在很大程度上依赖于图像的清晰度与光照均匀性。隧道内部环境光线不足且分布不均，极易导致图像局部过暗或高反光区域出现，从而掩盖细微裂缝特征。光照系统需采用环形 LED 光源或漫反射照明方式，以减小阴影干扰并增强裂缝边缘的对比度^[2]。

图像清晰度受限于设备分辨率、焦距调节与巡检速度匹配,若参数设置不当,会造成运动模糊或焦点偏移,影响后续特征提取效果。实际工程中,需综合考虑设备振动、镜头清洁度与环境尘埃等因素,通过动态曝光控制与图像稳定算法提升图像整体质量,为裂缝边界的精准识别提供有利条件。

2.3 数据预处理过程中的图像增强与去噪方法优化

巡检图像原始数据常伴随光照不均、背景杂乱及噪声干扰等问题,图像预处理阶段需增强与去噪手段提升后续检测的鲁棒性。亮度均衡算法可有效改善过暗或过亮区域,使裂缝纹理在全图中呈现一致性。对比度受限时,可采用直方图均衡化或自适应增强方法强化边缘特征,使微裂缝更加显著。图像去噪方面,中值滤波适用于随机噪声抑制,高斯滤波适合平滑处理而保留边缘轮廓。对于纹理类背景较强的图像,可引入双边滤波或小波去噪技术,提升纹理背景与裂缝区域的分离度。预处理质量直接决定模型训练的有效性和检测结果的精度。

3 衬砌裂缝检测的深度学习模型与训练方法

3.1 适用于裂缝检测的主流卷积神经网络结构对比分析

卷积神经网络在裂缝检测任务中表现出较强的特征自动提取能力,不同网络结构在检测精度与计算效率方面存在明显差异。浅层网络结构如传统 CNN 在特征表达能力上较为有限,对复杂背景下的细微裂缝识别效果不理想。VGG 系列网络通过加深网络层数提升了特征提取深度,但参数规模较大,计算成本较高。ResNet 结构引入残差连接,有效缓解了深层网络训练过程中的梯度消失问题,在保持高识别精度时提升了训练稳定性。U-Net 及其改进模型在像素级分割任务中优势明显,能够兼顾裂缝整体形态与边缘细节,更适合衬砌裂缝的精细化检测需求。

3.2 样本构建与数据集标签策略对模型性能的影响评估

裂缝检测模型的性能高度依赖于训练样本的质量与标签精度。巡检图像中裂缝形态差异较大,样本构建需覆盖不同宽度、长度及背景条件,以增强模型的泛化能力。数据集规模不足或类别分布失衡,容易导致模型偏向于背景区域,降低裂缝识别的召回率^[3]。标签策略方面,粗略标注虽可减少人工成本,但会削弱模型对裂缝边缘的学习能力;精细像素级标注则有助于模型准确捕捉裂缝形态特征,提高分割精度。实际应用中,常结合半自动标注与人工校正方式,在保证标签准确性时提升数据构建效率,为模型训练提供稳定的数据支撑。

3.3 融合注意力机制与迁移学习提升检测精度的研究探索

在复杂隧道环境下,裂缝特征往往被纹理背景和光照变化所干扰,引入注意力机制可引导模型聚焦于关键信息区域。通道注意力能够强化裂缝相关特征通道的权重分配,空间注意力则有助于突出裂缝在图像中的位置分布,提高特征表达的针对性。迁移学习技术引入大规模数据集上预训练的模型参数,缓

解了裂缝样本数量有限的问题,使模型在较少训练数据条件下仍具备良好的识别能力。将注意力机制与迁移学习相结合,可在保证训练效率时提升模型对细微裂缝和复杂背景的适应性,使检测结果更加稳定可靠。

4 裂缝宽度与长度自动分级评估的判别准则研究

4.1 裂缝特征参数提取在分级评估中的作用与方法

裂缝的自动分级依赖于对几何与纹理特征的全面提取,主要参数包括裂缝的长度、宽度、走向、密度及分布形态。宽度是最直接反映裂缝严重程度的指标,通常通过亚像素级图像处理技术实现精准测量。长度与走向关系到裂缝的扩展趋势,可利用边缘跟踪算法和霍夫变换进行提取。密度反映单位面积内裂缝的集中程度,适用于大面积衬砌面病害评估。纹理特征则通过灰度共生矩阵等方法分析裂缝区域与背景的差异性,有助于识别难以观察到的早期微裂缝。参数提取的完整性和准确性直接决定分级评估的科学性和判定模型的有效性。

4.2 基于分级标准的裂缝严重程度智能化判定逻辑构建

裂缝分级的智能化判定需依据工程规范中的量化标准进行逻辑体系设计,结合特征参数实现自动判别。不同标准对裂缝宽度、长度及发展状态设定分界值,如宽度在 0.2mm 以下多定义为轻微裂缝,超过 1.0mm 则划归为严重等级^[4]。构建规则型分类器或基于决策树、支持向量机的学习型模型,将提取的参数映射到相应等级标签。对交叉裂缝或复合裂缝类型,还需引入综合因子进行等级融合判定。为提升判定稳定性,需对裂缝边缘模糊区域引入置信度加权机制,避免因边界误差造成分级结果波动,使模型在实际应用中具备更高的准确性和适应性。

4.3 分级结果可视化展示与结构风险预警联动机制设计

裂缝分级结果在应用端需通过可视化形式直观表达,以辅助养护决策与风险控制。图像标注可采用伪彩色覆盖、裂缝走向叠加及等级符号注记等方式,将裂缝信息叠加于原始图像或隧道二维剖面上。空间分布数据构建三维点云或 GIS 平台,实现裂缝位置与等级的动态呈现,便于定位与趋势分析。为实现结构安全管理的自动化,分级系统需与预警机制联动,当检测结果达到设定阈值时,自动触发告警模块并推送至维护管理系统。风险等级与巡检频率、结构加固建议相结合,形成闭环式响应机制,实现从裂缝识别到风险干预的全过程智能协同。

5 智能检测技术在隧道巡检工程中的实际应用成效

5.1 典型隧道工程案例中的智能检测系统部署与运行情况

在某西南山区铁路隧道全长 3680 米的定期巡检工程中,部署了一套轨道式自动巡检平台,集成了高分辨率图像采集设备(分辨率达 5472×3648)、激光测距仪与环境感知模块,系统以每小时 2.5 公里的速度完成单次巡检。作业期间,图像采

集密度为每米 8 幅图像，确保覆盖率与重叠度满足精细化检测需求。检测系统采用深度卷积神经网络进行裂缝识别，识别结果直接叠加于数字化隧道剖面图上。在 2025 年连续四次检测周期内，系统共识别出有效裂缝图像信息 20437 张，平均识别耗时降至每幅图 0.3 秒。系统稳定运行时间累计超过 180 小时，无重大故障，现场部署验证了智能检测技术在长大隧道中的高效率、高可靠性和工程适用性。

5.2 实际应用中裂缝检测准确率与人工结果的对比分析

自动裂缝检测系统在实际应用中对比人工识别结果，展现出显著的效率与精度优势。在某市政地铁区间隧道段进行的评估中，选取 2000 幅代表性衬砌图像作为比对样本，人工识别由经验丰富的检测人员逐幅标注裂缝位置与等级，作为对比基准^[5]。系统识别结果显示，平均准确率为 94.2%，召回率为 91.6%，漏检率控制在 4.8% 以内。其中对宽度超过 0.5mm 的裂缝检测率超过 98%，对长度小于 30mm 的微裂缝识别准确率为 87% 左右。人工检测耗时合计约 48 小时，而智能系统完成同样任务仅需 5 小时，大幅提高了巡检效率，并减少因人为疲劳导致的疏漏与偏差。

参考文献：

- [1] 徐慧通.隧道结构裂缝自动检测技术和量化评估方法研究[D].北京交通大学,2025.
- [2] 赵鹏超.基于多模态特征融合的混凝土表面裂缝智能检测研究[D].东北林业大学,2025.
- [3] 王承亮.隧道衬砌病害数字化表征与轻量化管理方法[D].北京交通大学,2024.
- [4] 张瑞雪.隧道衬砌结构多病害检测与智能识别[D].石家庄铁道大学,2023.
- [5] 陈湘生,徐志豪,包小华,等.隧道病害监测检测技术研究现状概述[J].隧道与地下工程灾害防治,2020,2(03):1-12.

5.3 关键技术在多场景适应性与扩展性方面的实际表现

裂缝智能检测技术在不同类型隧道结构中应用时需具备良好的场景适应能力，尤其在光照不足、高湿、高粉尘等复杂环境中仍需保持稳定运行。在公路、地铁与铁路隧道等多场景部署中，系统通过模块化设计可灵活适应单轨或双轨布置，图像采集系统具备自动补光与曝光调节功能，有效应对不同材质衬砌表面的光照反射差异。算法模型引入迁移学习机制，对不同区域样本快速适配，仅需少量本地标注样本即可完成模型微调，缩短部署周期至两天以内。在既有结构与新建隧道中均完成验证，系统对喷混凝土面、环向拼装面与整体浇筑面等结构具备一致性的检测效果，适应性与扩展能力满足规模化应用需求。

6 结语

基于巡检图像的隧道衬砌裂缝智能检测与分级技术，已在裂缝识别精度、处理效率及风险预警能力方面展现出显著优势。融合深度学习模型、注意力机制与多源感知设备，实现了裂缝信息的高效提取与自动化分级。随着隧道基础设施智能化水平不断提升，该技术将在复杂环境适应性、跨区域模型迁移及大数据分析方面持续深化，推动隧道结构健康监测向智能决策与协同管养方向迈进。