

轨道交通隧道裂缝自动化监测研究及应用

杨 昆 贺秀珍

中铁第六勘察设计院集团有限公司 天津 300131

摘要：轨道交通隧道长期服役受荷载、材料、环境等因素影响易产生裂缝，严重威胁结构安全与运营稳定。本文结合工程实践，系统分析隧道裂缝的分类、特征及危害，阐述自动化监测核心原理与常用技术，对比其与传统人工监测的优劣。重点研究监测系统“硬件+软件”一体化设计及基于U-Net模型的算法优化，通过工程应用验证系统可行性，明确前期准备、现场部署、过程管控及后期维护要点。研究表明，优化后的监测系统识别准确率较高，量化误差控制在合理范围内，可实现裂缝精准监测与异常预警，为隧道安全运维提供技术支撑。

关键词：轨道交通隧道、裂缝、自动化监测、系统设计、算法优化；具体应用

引言：随着轨道交通网络快速扩张，隧道服役年限增长，裂缝作为常见病害，易引发渗漏、衬砌坍塌等安全事故，传统人工监测效率低、精度差，难以满足全域实时监测需求。当前自动化监测技术虽有应用，但存在复杂环境下识别准确率低、微小裂缝检测灵敏度不足等问题。基于此，本文立足中铁第六勘察设计院工程实践，开展轨道交通隧道裂缝自动化监测研究，优化监测系统与算法，通过工程应用验证技术可行性，旨在解决传统监测痛点，提升隧道安全运维智能化水平，为同类工程提供参考。

1 轨道交通隧道裂缝相关理论与危害分析

1.1 隧道裂缝的分类与特征

轨道交通隧道裂缝按成因分为荷载型、材料型和环境型：荷载型由列车振动、围岩压力等外部荷载引发，呈规则线性分布；材料型源于混凝土收缩、骨料不均等自身缺陷，多为不规则短裂缝；环境型由温湿度变化、冻融循环导致，形态多样且易扩展。按形态尺寸可分为宏观裂缝（宽度 $\geq 0.2\text{mm}$ ，易观察）和微小裂缝（宽度 $< 0.2\text{mm}$ ，隐蔽性强，需精准监测）。

1.2 裂缝对轨道交通隧道的危害

裂缝严重影响隧道结构安全与运营稳定，既削弱衬砌承载力，引发渗漏、掉块，严重时导致衬砌坍塌，威胁列车安全；也会降低耐久性，地下水、有害气体通过裂缝侵入，腐蚀钢筋与混凝土，缩短服役寿命。此外，裂缝扩展产生振动噪声影响乘客舒适度，增加维护成本，若未及时监测处置，可能引发运营中断等严重事故^[1]。

2 轨道交通隧道裂缝自动化监测技术基础

2.1 自动化监测核心原理

轨道交通隧道裂缝自动化监测以“数据采集-传输-处理-分析-预警”为核心逻辑，依托多学科技术融合实

现裂缝全流程精准监测。其核心是通过专用传感或视觉设备捕捉裂缝的形态、尺寸及变化信号，将物理信号转化为可量化数字信号，经传输模块送至处理终端，通过算法降噪、分析解读，实现裂缝实时监测与异常预警。其中，非接触式监测以光学成像、激光传感为核心，实现无接触测量；数据采集与传输遵循“实时性、高精度”原则，采用有线与无线结合方式，确保数据高效稳定传输，为后续分析提供可靠支撑。

2.2 常用自动化监测技术分类

轨道交通隧道裂缝自动化监测技术主要分为三类，适配不同隧道环境与需求。机器视觉监测技术应用最广，通过线阵相机、隧道巡检机器人搭载高清成像设备捕捉衬砌图像，结合图像识别算法实现裂缝自动识别与量化，具有监测范围广、可视化效果好的优势；光纤传感监测技术依托光纤光传输特性，将光纤嵌入衬砌，通过监测光信号变化感知裂缝细微变形，精度达微米级，适用于微小裂缝长期监测；激光扫描与三维重建技术通过激光扫描仪获取衬砌三维数据、构建模型，对比不同时期模型差异，精准识别裂缝位置、尺寸及扩展趋势，适用于隧道全域裂缝排查与整体监测。

2.3 自动化监测与传统人工监测的对比分析

相较于传统人工监测，自动化监测优势显著且互补性强。监测效率上，人工监测依赖人员现场巡检、尺量，受隧道长度、环境限制，效率低且难以实现全域实时监测；自动化监测可24小时不间断运行，大幅提升效率、降低人工强度。监测精度上，人工监测受操作水平、主观判断影响，误差大且难以捕捉微小裂缝；自动化监测依托专业设备与算法，精度可达 0.01mm ，能精准捕捉微小裂缝变化。适用场景与成本上，人工监测适用于短距离、局部排查，初期成本低但长期运维成本高；自动化

监测适用于长距离、全域、长期监测，初期设备投入高，但可大幅降低长期人工成本，规避安全风险，更适配隧道长期安全运营需求^[2]。

3 轨道交通隧道裂缝自动化监测系统设计与算法优化

3.1 轨道交通隧道裂缝自动化监测系统设计

轨道交通隧道裂缝自动化监测系统设计以“精准、稳定、适配”为核心，结合隧道运营环境与监测需求，构建“硬件+软件”一体化监测体系，具体设计内容如下：（1）系统总体设计。遵循可靠性、兼容性、经济性原则，明确设计目标为实现裂缝宽度、长度等参数的实时监测，监测精度不低于0.01mm，响应时间不超过10s，适配隧道内温湿度波动、列车振动等复杂环境。整体采用“采集-传输-处理-预警”四级架构，实现数据从现场捕捉到终端分析的全流程闭环，同时预留接口，便于后续与隧道运维管理平台对接。（2）硬件系统设计与选型。硬件核心由数据采集、传输、存储三大模块组成：数据采集模块选用高清线阵相机、光纤传感器及智能补光设备，相机分辨率不低于2000万像素，传感器精度达微米级，适配隧道黑暗、潮湿环境；传输模块采用有线与无线结合方式，隧道内主干采用工业以太网传输，偏远监测点位采用5G无线传输，确保数据稳定无丢失；存储模块选用工业级固态硬盘，支持海量监测数据长期存储，同时具备数据备份功能。（3）软件系统设计。软件分为数据预处理、裂缝分析、预警可视化三大模块，采用模块化设计，便于后期升级维护。数据预处理模块实现监测数据的去噪、增强处理，剔除列车振动、光线变化带来的干扰数据；裂缝分析模块实现裂缝自动识别与参数量化；预警可视化模块采用图形化界面，实时展示裂缝状态，设置三级预警阈值，异常时自动触发声光预警。

3.2 隧道裂缝自动化监测算法优化研究

针对现有监测算法在复杂隧道环境下识别准确率低、微小裂缝检测灵敏度不足等问题，结合轨道交通隧道裂缝特征，开展算法优化研究，具体优化内容如下：（1）裂缝识别算法优化。基于U-Net深度学习模型进行改进，引入多尺度注意力融合机制，增强对微小裂缝（宽度 < 0.2mm）的特征提取能力，同时加入隧道衬砌背景抑制算法，剔除混凝土表面纹理、污渍等干扰因素，提升复杂环境下裂缝识别准确率，优化后识别准确率提升至95%以上。（2）裂缝参数量化算法优化。针对裂缝宽度、长度计算误差较大的问题，采用亚像素级边缘检测算法，精准定位裂缝边缘轮廓，结合透视校正技术，消除相机拍摄角度带来的测量误差；同时引入温湿度校正模型，对不同环境下的量化结果进行修正，确保测量精度满足工程监测要

求，量化误差控制在 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内。（3）算法性能优化。采用轻量化网络结构对优化后的算法进行压缩，降低计算复杂度，提升数据处理速度，确保算法能适配隧道现场终端的实时处理需求，单帧图像处理时间缩短至50ms以内；同时通过大量隧道裂缝样本训练，提升算法的泛化能力，适配不同地质条件、不同裂缝形态的监测需求^[3]。

4 轨道交通隧道裂缝自动化监测工程具体应用

4.1 工程应用前期准备

轨道交通隧道裂缝自动化监测工程应用前期，需结合隧道实际工况完成全面准备工作，准备内容如下：（1）工程现场勘察与监测需求梳理。组织专业技术人员开展隧道现场勘察，全面排查衬砌结构现状，明确隧道起止里程、断面尺寸、衬砌厚度等基本参数，记录现有裂缝的初步位置、形态及分布特点。结合隧道运营年限、列车通行频次、围岩地质条件，梳理监测需求，明确监测范围、精度、频率等核心指标，例如运营超10年隧道，监测频率设为每小时1次，微小裂缝监测精度需达0.01mm。（2）监测点位布设规划。遵循“重点突出、全面覆盖”原则，规划布设方案：隧道拱顶、拱腰、边墙等应力集中部位，监测点位间距控制在5-8m；隧道进出口、围岩突变段、施工缝等特殊部位单独增设点位。同时避开列车灯光直射、通风口等干扰区域，确保设备稳定采集数据，点位布设后绘制详细分布图，标注点位编号、安装高度及监测范围。（3）设备选型与调试准备。结合隧道温湿度波动、列车振动、粉尘多等环境，选用适配设备：数据采集模块采用防尘防水抗振动的高清线阵相机（分辨率 ≥ 2000 万像素）和微米级光纤传感器；传输模块采用工业以太网与5G无线结合模式；存储与处理终端选用工业级设备，适配复杂供电环境。设备进场后，提前调试性能、采集精度及兼容性，排除故障^[4]。

4.2 自动化监测系统现场部署与安装

系统现场部署与安装严格遵循施工规范，结合隧道现场条件分步骤作业，确保设备牢固、线路规范，具体流程如下：（1）设备安装作业。按监测点位分布图依次安装设备：线阵相机用支架固定，安装高度3-4m，调整镜头角度覆盖目标区域，避免盲区；光纤传感器嵌入衬砌预设孔位，用专用粘结剂固定，确保与衬砌紧密贴合，减少振动干扰；补光设备与相机同步安装，调整亮度适配隧道光线，避免影响成像质量。（2）传输线路铺设。采用阻燃抗干扰专用线缆，沿隧道侧壁支架铺设，避开列车干扰区域，线缆接头做防水密封处理，防止地下水侵蚀。有线传输用工业以太网线连接各点位与控制终端；无线传输在偏远点位安装5G信号放大器，确保信号稳定、

数据全覆盖。线路铺设后,检查连接情况并测试传输稳定性。(3)系统调试与试运行。设备与线路安装完成后开展整体调试:调试数据采集模块,确保相机成像清晰、传感器采集准确;调试传输模块,排查传输延迟、数据丢失等问题;调试处理终端与软件系统,确保预处理、裂缝识别算法正常运行,预警阈值合理。

4.3 监测过程管控与数据处理

监测系统正式运行后,需加强过程管控,规范数据采集与处理流程,确保数据真实可靠,具体内容如下:(1)日常运行管控。安排专人负责运维,每日检查相机、传感器、传输设备工作状态,清理设备表面粉尘杂物,检查线路连接,及时处理故障。同时记录隧道温湿度、振动等环境参数,为数据校正提供依据;严格按监测频率采集数据,保障数据连续性,避免缺失。(2)数据预处理。原始数据含大量干扰信息,需通过滤波算法剔除列车振动、光线变化、粉尘等干扰,确保数据准确;用插值法补全缺失数据,剔除异常无效数据;将预处理后的数据转化为可量化数字信号,统一格式便于后续分析。(3)数据分类与存储。按监测点位、时间、裂缝参数等维度分类整理数据,明确每组数据对应的点位、采集时间、裂缝宽长等信息。采用“本地存储+云端备份”模式,本地用工业级固态硬盘保障安全,云端定期同步数据防止丢失,预留接口与隧道运维管理平台对接,实现数据共享。

4.4 工程应用后期维护与系统优化

为确保监测系统长期稳定运行,满足隧道长期监测需求,需做好后期维护与优化工作,具体内容如下:(1)定期维护工作。制定常态化维护计划,每月全面检查监测设备,包括精度校准、零部件更换、防水密封检查等,例如每3个月校准光纤传感器,及时更换老化线缆与零部件;每半年升级系统软件,优化算法、修复漏洞。同时清理隧道内影响监测的障碍物,保障设备正常工作。(2)故

障应急处置。建立应急机制,明确响应流程与责任分工,当出现设备故障、传输中断、算法异常等问题时,运维人员2小时内到场处置,快速排查原因并恢复系统运行。例如传输中断时,优先检查线路,损坏则及时更换,信号干扰则调整设备位置或增设放大器。(3)系统优化调整。结合监测中出现的问题与隧道运营变化优化系统:监测点位有盲区或采集不准确时,调整位置或增加点位;算法识别准确率不足时,补充样本训练、优化参数;运营工况变化时,调整监测频率、预警阈值等指标,确保系统适配实际需求,提升监测针对性与可靠性^[5]。

结束语:本文完成了轨道交通隧道裂缝自动化监测的理论研究、系统设计及工程应用全流程探索,明确了裂缝分类危害与监测技术要点,优化后的监测系统有效解决了复杂环境下监测精度与效率问题,工程应用效果良好。该研究实现了从人工监测向自动化监测的转型,为隧道裂缝精准管控提供了完整解决方案。未来可结合数字孪生、多源数据融合技术,进一步优化系统泛化能力,拓展监测场景,推动轨道交通隧道运维向更智能、更高效的方向发展,保障隧道长期安全稳定运营。

参考文献:

- [1]刘建刚.自动化监测技术在地铁隧道变形监测中的应用研究[J].工程技术研究,2024,9(20):66-68.
- [2]杨钧涵.轨道交通隧道智能监测项目研究[J].微型计算机,2026(3):109-111.
- [3]李文雅,赵秀琴.测量机器人自动化监测系统在轨道交通运营隧道监测中的应用[J].城市勘测,2023(5):139-143.
- [4]高小宁,马瀛.静力水准自动化监测系统在西安地铁地裂缝设防段的监测应用研究[J].测绘技术装备,2022,24(1):118-122.
- [5]余朝阳,牟春霖,陈宏斌,巩健,豆孝磊.轨道交通隧道裂缝自动化监测研究及应用[J].铁道勘察,2025,51(6):7-13.