

城市轨道交通隧道高效检测装备

屈英豪, 杨政委, 陈 志, 王诗迪

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401121)

摘要: 随着城市轨道交通保有量不断增加, 受自身性能劣化和周边环境影响所产生的裂缝、渗漏水、剥落等病害已逐步显现, 人工巡检受光照、视距等因素限制, 在检测质量和效率上已愈发不能满足运营要求。为提升检测效率和质量, 开发了一套城市轨道交通隧道高效检测装备, 并在城市轨道正线中进行了应用。该装备可实现轨道高速行驶下的隧道表观病害影像快速采集, 使外业检测效率大幅提升, 配套图像处理与人工智能算法实现了裂缝、渗漏水、剥落等病害的智能识别, 数据成果相比于人工巡检更丰富、精准和高效, 具有良好的应用前景。

关键词: 城市轨道交通; 隧道; 高效; 检测装备

中图分类号: U452.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0410-04

Efficient Detection Equipment for Urban Rail Transit Tunnels

QU Yinghao, YANG Zhengwei, CHEN Zhi, WANG Shidi

(Chongqing Surveying Institute Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: With the increasing number of urban rail transit, the cracks, water leakage, spalling and other diseases caused by the deterioration of its own performance and the surrounding environment have gradually appeared. The manual inspection limited by factors such as light and sight distance, and the detection quality and efficiency have become more and more unable to meet the operational requirements. In order to improve the detection efficiency and quality, a set of efficient detection equipment for urban rail transit tunnels is developed and applied in the urban rail. The equipment can realize the rapid collection of tunnel apparent disease images under high-speed rail driving, which greatly improves the efficiency of field detection. The intelligent identification of cracks, water leakage, spalling and other diseases are realized through the supporting image processing and artificial intelligence algorithms. Compared with manual inspection, the data results are richer, more accurate and more efficient, which has the good application prospects.

Keywords: urban rail; tunnel; efficient; detection equipment

0 引言

截至2024年5月, 中国共有54个城市开通了地铁, 其运营总里程达到了10 273.7 km, 轨道交通养护维护量巨大。

由于轨道隧道长期受地质、水文、温度、湿度、施工期质量缺陷、材料性能劣化、外部施工等多种因素的影响, 轨道交通隧道结构不可避免地产生病害, 时刻威胁轨道交通的安全运营^[1]。如果不能及时发现病害、不能有效评估病害状态、不能准确预测病害的

发展趋势, 那么结构病害容易导致严重的安全事故。

目前, 人工巡检是保障城市轨道交通运维的重要手段。城市轨道交通隧道相比于公路隧道, 具有里程大、管线设备多、光线昏暗的特点, 对人工巡检的质量和效率提出了严重的挑战^[2]。人工巡检目前主要面临的困难有以下几点:

- (1) 巡检内容多, 人工效率低;
- (2) 隧道光线昏暗, 容易漏检;
- (3) 隧道高处病害人工无法量测, 主观性强;
- (4) 后期数据成果单一, 以纸质文档为主, 不易重复利用。

随着机器视觉、激光扫描仪、人工智能技术的快速发展, 快速拍照设备替代人工进行隧道巡检已成为现实^[3]。目前, 国内外许多机构纷纷针对隧道检测装备进行了研制, 包括日本计测检测株式会社、韩国检测技术研究所、中国铁道科学研究院、同岩科

收稿日期: 2025-04-27

基金项目: 重庆市技术创新与应用专项(CSTB2025TIAD-qykjggX0124); 大连地铁4号线一期工程第三方监测项目(二标段)技术研发子项

作者简介: 屈英豪(1994—), 男, 博士, 高级工程师, 从事基础设施结构监测检测工作。

技、中国矿业大学等单位在移动检测装备开展了一系列研究,取得了丰硕的研究成果^[4-5]。这类轨道移动检测装备按照搭载的设备类型可主要分为搭载激光扫描仪^[6]、高速工业相机^[7]两类。其中激光扫描雷达主要用于检测隧道收敛变形,在裂缝等微小病害的检测上精度还存在不足;高速工业相机由于其高分辨率则可以在表观病害检测上表现得更为良好。此外,根据车载平台主要分为无人巡检小车、载人巡检小车和轨道机车三类,分别主要应用于低、中、高速工况下的轨道隧道检测任务。各种移动装备均有其自身的特点和应用场景,本文在此主要介绍了一套轨道高效智能检测装备的硬件组成、性能及其应用效果。

1 城轨智能检测装备

本装备的技术原理主要包含机器视觉、图像处理和目标检测技术。整个装备的作业流程可以表述为:将采集模组安装在轨道工程车头部,工程车在运行过程中将隧道表面图像快速采集至控制中心,之后通过集人工智能与图像处理为一体的后处理软件对采集隧道图像进行分析,识别出隧道的裂缝、渗漏水等病害位置、形态以及几何参数,见图1。

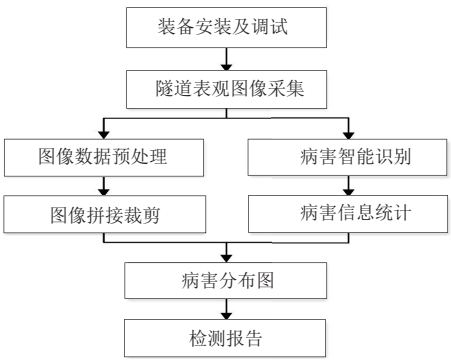


图1 城轨智能检测装备工作流程

整套设备包含工业相机、光源、控制中心三大板块。整套设备的最大特点为分离式设计、模块化安装,整套装备见图2。相比于其他移动检测装备,本装备仅包含检测模组和控制中心两个部分,通过适配检测模组和轨道运营单位现有工程车辆,可以做到1 h以内的安装和调试时间。通过便携式安装设计思路,实现了一台设备检测多条轨道线路,相比于一条线路配置一台隧道检测车的解决方案,大幅降低了养护成本。

整个隧道采集模组采用5个高速线阵工业相机,10个光源,相机根据隧道尺寸和相机焦距按照一定



图2 城轨隧道智能检测装备实物图

角度均匀分布在隧道中心,相机之间成像范围内保证有一定的重叠,便于后续图像的拼接。光源采用激光光源,光源功率根据成像距离进行计算。通过高精度里程传感器、多传感器融合算法和精密控制点校正算法等多种里程控制手段,可实现病害厘米级定位精度,保障了病害的高精度定位。整套装备的参数见表1。

表1 装备性能参数

性能参数	实施方式	指标
最小裂缝精度	机器视觉	0.2 mm 宽度裂缝
检测速度	取决于车载平台	最高 100 km/h
病害识别准确率	二阶段深度学习模型	大于 95%
安装部署	当天测试 现场安装	1h 快速部署
定位精度	传感器+控制点	厘米级

2 工程应用

本次选取了X市地铁Y号线开展了装备的应用测试。地铁Y号线以城市地下矿山法隧道为主,车载平台选用Y号线运营单位的工程车作为本装备的移动平台。

2.1 数据采集

整个数据采集全过程仅1人在旁值守,无需太多人工干预。测试区间长度20 km左右,车辆从工程车库出发至测试区间终点然后返回,全程耗时1 h左右,受作业过程停车等候指令、正线限速规定等限制,实际检测约时间40 min,本次测试实际检测最大速度达到60 km/h。

本次测试数据采集过程中控制中心可以实时反馈隧道影像,便于作业人员观察成像质量是否满足要求,采集过程见图3。数据原始图像采用黑白影像,相比于彩色影像,黑白影像能全部包含裂缝、渗漏水、剥落、露筋等病害特征信息,同时具有更小的文件,可以有效降低人工智能识别处理难度。原始数据相比于人工巡检拍照亮度更为均匀,隧道各处细节更为清晰,非常有利于后续病害筛查。



图3 数据采集过程

2.2 数据后处理

整个数据后处理是为了将采集得到的原始图像经过图像预处理、病害智能识别、裁剪拼接、成果出图这四个主要步骤,才能呈现出较好的检测结果,以下为数据后处理的具体过程。

(1) 图像预处理

由于隧道内部光线昏暗,在拍照过程中需要对相机画幅内进行补光,但由于受隧道内部灯光、设备阴影等影响,会对后续人工智能的判别造成一定的影响,因此在进行后续工序前,需要对原始图像进行预处理,整个预处理功能主要包括亮度调整、对比度调整、图像去噪等^[7],预处理效果见图4。

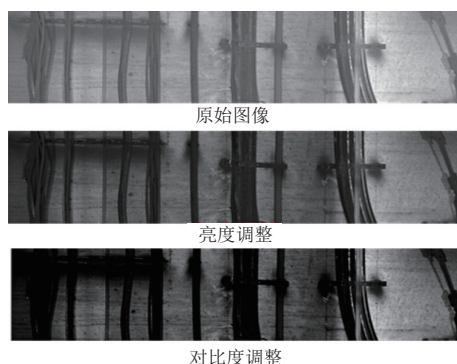


图4 隧道预处理效果

(2) 病害智能识别

病害智能识别采用基于深度学习的目标检测模型。整个智能过程包含了样本标注、模型训练和目标检测。整个模型是建立在大量数据基础之上的网络结构,样本量越多,样本质量越好,得到的网络越稳定,测试结果越准确。本系统以城市轨道交通隧道影像作为病害标注样本集,采用如 Labelimg 等样本标注软件,利用矩形框框选出病害位置,并确定病害类别,最终生成病害样本库文件,用于后续的目标检测模型训练。

目前,目标检测模型可大致分为以 YOLO 为代表的一阶段目标检测算法^[8]和两阶段目标检测算法^[9]。一阶段目标检测算法在计算速度上具有较大

的优势,适合用于边缘计算设备进行实时检测。两阶段目标检测算法在检测精度方面整体高于同时期的单阶段目标检测算法,但在速度和计算量方面较弱,模型体量较大,需占用较多内存空间,计算过程复杂。

为了保障检测的精度,后处理系统采用了基于 R-FCN 的二阶段深度学习模型进行病害的人工智能识别,整个过程需经过特征提取网络、RPN 候选框生成、位置敏感得分、ROI 池化、分类与回归网络、NMS 消除冗余框、检测结果输出等步骤,流程见图5。经过训练后的模型对隧道表观病害识别准确率超过 95%,识别效果见图6。

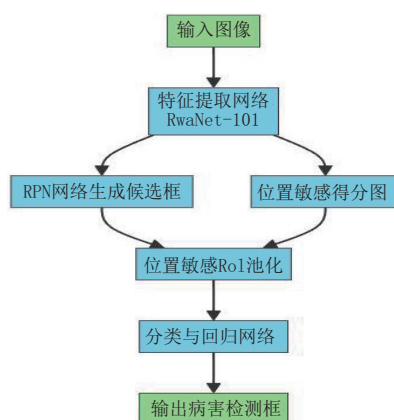


图5 基于 R-FCN 的隧道病害智能检测流程图

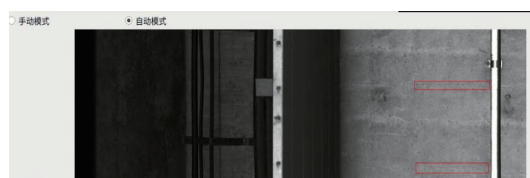


图6 人工智能识别病害效果

(3) 图像裁剪拼接

整个隧道是由 5 个相机所拍摄的图像组成,但 5 个相机在设计时保障了相邻相机采集图像之间存在重叠区域,通过重叠区域的相同特征点在图像平面坐标之间的关系,则可以实现图像的拼接对齐,形成完整的隧道环向高清影像。拼接过程见图7,其中利用 1 号相机所拍摄的拱顶和 2 号相机所拍摄的拱腰重叠部分中特征明显的点 A 和点 B 进行裁剪,可以得到修正后的隧道环向影像。由于本装备采用线阵扫描相机,因此无须在隧道纵向进行影像裁剪。

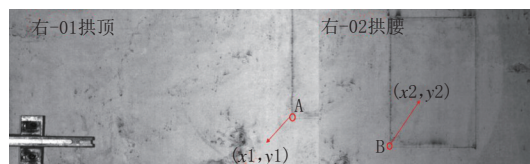


图7 隧道影像拼接特点选取示意图

(4)成果出图

按照图 1 中的步骤完成以后,可以输出带标注的隧道病害展布图,为了防止图片太大导致加载时间过久,展布图按 50 m 一张的格式进行出图,见图 8。从图 8 可知,展布图中清晰标注出了不同宽度的裂缝(曲线表示),采用颜色进行区分,成果按照 0.2~1 mm 共划分了 5 个等级,同时也将图中的渗漏水矩形区域(方框表示)和面积进行了标注。相比于人工巡检所绘制的传统 CAD 病害展布图,数据成果有了质的提升,可以清晰看到病害的原貌,也能够从图中获取更多隧道特征信息实现病害现场的快速定位。此外,经过处理后得到的隧道病害展布图除了能够表述病害信息,还能够清晰获取接触线、疏散平台、线缆、电气设备等隧道内的设备设施破损情况,即本影像成果经过拓展也可以应用于附属设施的外观检查。

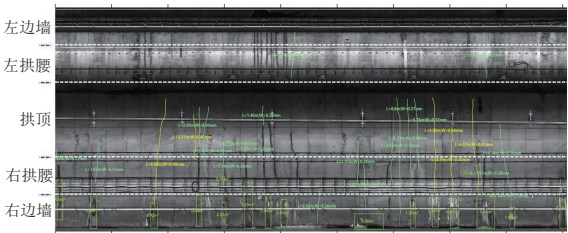


图 8 城市轨道交通隧道高清病害展布图

3 结 语

为了克服城市轨道交通隧道人工巡检效率低、易漏检的问题,本文提出了一种城市轨道交通隧道高效检测装备,该装备区别于其他同类移动检测装备,具有小型化、可灵活部署的特点,能够适配运营单位现有工程车辆,可实现列车高速行驶下隧道表观高清影像的采集。原始数据经过包含图像预处理、人工智能病害检测、图像裁剪拼接的后处理系统分析后,

可以得到带病害标注的病害高清展布图。相比于人工巡检,本文所提出的装备在检测效率和数据成果方面具有质的提升,针对隧道大部分巡检任务可以替代传统人工巡检方案。但也存在一定的不足之处:由于本装备依赖于轨道车作为移动载具,仅能实现轨行区内的病害检测,轨道站厅、联络通道等区域仍需人工巡检的支持,在今后形成以“轨道车巡检为主+人工巡检为辅”综合巡检模式,可以满足日益增长的城市轨道运营养护需求,全方位保障轨道交通隧道结构的安全。

参考文献:

- [1] 牟军东,冯师.地铁隧道病害分析及综合整治研究[C]//2018 轨道交通·杭州湾高峰会议论文集.杭州:浙江省发改委,浙江省人民政府,2018.
- [2] 杨玲芝,方恩权.轨道交通隧道结构病害检测技术综述与发展趋势[J].都市轨道交通,2017,30(1):20-25;76.
- [3] 黄丹樱,韦强,朱柳毅,等.智能隧道检测车的现状及改进策略[J].现代城市轨道交通,2022(11):7-12.
- [4] 黄宏伟,孙龔,薛亚东.基于机器视觉的隧道衬砌表面病害检测技术研究进展[C]//2014 中国隧道与地下工程大会(CTUC)暨中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十八届年会论文集.北京:中国土木工程学会隧道及地下工程分会,2014.
- [5] 王平让.隧道病害快速检测技术现状及分析比较[J].公路与汽运,2016(3):241-245.
- [6] 沈至毅,谭周.GRP5000 隧道检测车在上海地铁的应用研究[J].山西建筑,2013,39(27):158-159.
- [7] 王睿,漆泰岳,朱鑫,等.隧道检测裂缝的图像处理研究[J].铁道标准设计,2014,58(10):93.
- [8] 武治国,王延杰.一种基于直方图非线性变换的图像对比度增强方法[J].光子学报,2010,39(4):755-758.
- [9] 邵延华,张铎,楚红雨,等.基于深度学习的 YOLO 目标检测综述[J].电子与信息学报,2022,44(10):3697-3708.
- [10] 王森,伍星,张印辉,等.基于深度学习的全卷积网络图像裂纹检测[J].计算机辅助设计与图形学学报,2018,30(5):859-867.

(上接第 402 页)

- [6] 孙强,李厚恩,秦四清,等.地下水引起的基坑破坏分析[J].岩土工程学报,2006(增刊1):1428-1432.
- [7] 周朋.地铁明挖基坑内撑失效分析及基坑抢修恢复方法[J].价值工程,2024,43(16):14-17.
- [8] 刘庭金,朱超,陈耘杰,等.某花岗岩残积土基坑诱发隧道变形成因及控制[J].铁道工程学报,2025(3):42-47.
- [9] 纳兴仓,闫永福,李玉芝.某特小流域设计洪峰流量计算分析[J].水利科技与经济,2016(8):85-87.
- [10] 雷亚娇.基于推理公式法的某流域防洪设计流量计算研究[J].地下水,2023,45(1):214-215.

- [11] 茹树青.中小河流河道治理工程设计洪峰流量计算方法的分析[J].水利技术监督,2014,22(2):36-38.
- [12] 林鸿敏.小流域设计洪水计算方法探讨[J].甘肃水利水电技术,2018,54(6):1-7.
- [13] 乐莉霞.无资料流域设计洪峰流量计算方法研究[D].北京:中国矿业大学,2019.
- [14] 四川省水利电力局水文总站.四川省水文手册[M].成都:四川省水利电力局水文总站,1976.
- [15] 王英军,黄昌乾.肥槽回填土常见工程问题与处理方法[J].岩土工程技术,2019,33(2):84-88.