

铁路隧道衬砌病害轻量化智能检测技术研究

柳鹏举

甘肃铁科建设工程咨询有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要: 铁路隧道衬砌病害威胁运营安全,轻量化智能检测技术是保障运维高效的关键。通过系统分析衬砌结构性、渗漏水及侵蚀性等病害类型,明确地质条件复杂、设计施工缺陷及恶劣运营环境等成因。探讨基于图像识别、地质雷达、光纤传感的检测技术原理与应用优势,剖析多技术融合、智能化升级、设备轻量化的发展趋势,为提升铁路隧道检测效率与精准度提供理论支撑,助力铁路基础设施安全保障体系建设。

关键词: 铁路;隧道衬砌病害;轻量化;智能检测技术

引言

随着铁路交通网络快速发展,隧道工程数量持续增长,衬砌病害问题日益凸显。结构性裂缝、渗漏水及侵蚀等病害不仅缩短隧道使用寿命,更严重威胁行车安全。传统检测手段存在效率低、精度差等局限,难以满足现代铁路运维需求。在此背景下,轻量化智能检测技术成为研究热点。本文系统梳理铁路隧道衬砌病害类型及成因,深入探讨图像识别、地质雷达等智能检测技术,分析其发展趋势,旨在为铁路隧道病害检测技术革新提供参考。

1 铁路隧道衬砌病害类型及成因分析

1.1 病害类型

1.1.1 结构性病害

铁路隧道衬砌结构性病害主要表现为衬砌开裂、变形及坍塌等破坏形式。在复杂地质应力和列车动载的长期作用下,衬砌结构内部应力分布不均,当局部应力超过材料极限强度时,混凝土衬砌会出现裂缝。这些裂缝初期可能较为细微,但随着时间推移,在地下水侵蚀、温度变化等因素影响下,裂缝不断扩展,进而引发衬砌变形。严重时,衬砌结构丧失承载能力,导致局部坍塌,威胁铁路行车安全。不同类型的围岩与衬砌之间的相互作用差异,也会促使结构性病害的产生和发展,如软弱围岩地段,围岩压力过大易使衬砌结构发生整体或局部变形。

1.1.2 渗漏水病害

渗漏水是铁路隧道常见的病害之一,其表现形式多样,包括点漏、线漏、面漏以及涌水等。隧道开挖破坏了地下水的原始赋存状态,改变了地下水的渗流场。衬砌结构若存在施工缝、变形缝或混凝土浇筑不密实形成的孔隙,地下水便会在水头压力作用下,通过这些薄弱部位渗入隧道内部。长期渗漏水不仅会降低隧道内的运

营环境质量,影响设备正常运行,还会对衬砌结构产生溶蚀作用,进一步扩大渗水通道,加剧渗漏水现象。在寒冷地区,渗漏水还可能导致衬砌背后积水结冰,产生冻胀力,对衬砌结构造成破坏。

1.1.3 侵蚀性病害

侵蚀性病害是由于衬砌材料受到周围环境介质的化学侵蚀而发生的劣化现象。地下水 and 土壤中含有的硫酸盐、碳酸盐、氯盐等化学物质,会与衬砌混凝土中的水泥水化产物发生化学反应。例如,硫酸盐与水泥水化产物中的氢氧化钙反应,生成钙矾石,钙矾石在生成过程中体积膨胀,导致混凝土开裂破坏;氯盐则会破坏混凝土中钢筋的钝化膜,引发钢筋锈蚀,降低衬砌结构的承载能力。酸性地下水对混凝土也具有较强的侵蚀作用,会溶解混凝土中的氢氧化钙等成分,使混凝土强度下降,从而影响隧道衬砌的耐久性和安全性。

1.2 成因分析

1.2.1 地质因素

地质条件是影响铁路隧道衬砌病害产生的重要因素。复杂的地质构造,如断层、褶皱发育地段,岩层破碎,完整性差,隧道开挖后,围岩自稳能力弱,容易产生较大的围岩压力,对衬砌结构造成挤压变形。不同类型的围岩,其物理力学性质差异显著。软弱围岩,如黏土岩、页岩等,具有强度低、变形大的特点,在隧道开挖过程中易产生较大的收敛变形,导致衬砌开裂;硬岩地段,若存在高地应力,在隧道开挖卸荷后,可能会引发岩爆现象,对衬砌结构造成冲击破坏。地下水的存在及其赋存状态也会影响围岩的稳定性和衬砌的耐久性,丰富的地下水会软化围岩,增加围岩压力,同时对衬砌产生侵蚀作用。

1.2.2 设计与施工因素

设计与施工环节对隧道衬砌的质量和耐久性有着直

接影响。在设计阶段,如果对地质条件勘察不详细,未能准确掌握围岩特性和地下水情况,会导致衬砌类型和参数选择不合理,无法满足实际工程需求。施工过程中,混凝土浇筑质量控制不严,如振捣不密实、养护不到位,会使衬砌混凝土存在蜂窝、麻面等缺陷,降低混凝土的抗渗性和强度。施工缝、变形缝处理不当,止水带安装不规范,会成为地下水渗漏的通道。隧道开挖方法选择不当,超挖、欠挖现象严重,也会影响衬砌结构的受力状态,导致衬砌产生病害。

1.2.3 运营环境因素

铁路隧道投入运营后,长期处于复杂的运营环境中,这些环境因素会加速衬砌病害的发展。列车运行产生的动荷载具有高频、反复作用的特点,会使衬砌结构产生疲劳损伤,导致裂缝的产生和扩展。隧道内的温湿度变化频繁,混凝土材料热胀冷缩,在温度应力作用下,衬砌表面易产生裂缝。隧道内的空气湿度较大,机车运行产生的有害气体,如二氧化硫、氮氧化物等,会与水结合形成酸性物质,对衬砌混凝土和钢筋产生腐蚀作用。隧道内的粉尘、油污等污染物也会附着在衬砌表面,影响衬砌的外观质量,并在一定程度上加速衬砌的劣化。

2 铁路隧道衬砌病害轻量化智能检测技术分析

2.1 基于图像识别的检测技术

基于图像识别的铁路隧道衬砌病害检测技术,依托高分辨率成像设备与深度学习算法构建起智能化检测体系。在实际检测中,搭载于移动检测平台的高清摄像机,以设定的拍摄频率对隧道衬砌表面进行连续拍摄,快速获取海量衬砌图像数据。利用卷积神经网络(CNN)强大的特征提取能力,对图像中的裂缝、剥落、渗漏水等病害特征进行识别与分类,通过训练大量标注样本,使算法能够精准捕捉不同病害的纹理、形状和灰度变化特征。该技术具备显著优势,第一,非接触式检测方式可在不干扰铁路正常运营的前提下实施,大幅提升检测效率;第二,通过数字化图像存储与分析,能够实现病害的长期动态监测,准确记录病害发展趋势。其应用场景广泛,无论是新建隧道的质量验收,还是运营隧道的定期巡检,都能发挥重要作用。该技术也存在局限性,对于衬砌内部的空洞、脱空等隐蔽性病害检测能力有限,且在隧道内光照条件复杂、粉尘较多的环境下,图像质量易受影响,可能导致病害误判或漏判^[1]。

2.2 地质雷达检测技术

地质雷达检测技术基于电磁波在不同介质中传播特性差异的原理,实现对铁路隧道衬砌病害的检测。检测

时,地质雷达发射天线向衬砌结构发射高频电磁波,当电磁波遇到衬砌与围岩界面、空洞、疏松等不同介电常数的介质界面时,会发生反射、折射和散射现象,接收天线捕获反射回波信号,并将其转化为时间-深度剖面图。专业人员通过对剖面图中波形的相位、振幅、频率等信息进行分析,可推断衬砌厚度是否均匀、内部是否存在空洞、脱空以及围岩与衬砌之间的接触状态等。该技术在检测衬砌内部隐蔽性病害方面表现突出,能够快速、连续地对隧道衬砌进行大面积扫描,获取高分辨率的二维或三维图像,直观呈现病害的位置、大小和范围。适用于各类地质条件下的铁路隧道,尤其在复杂地质区域,可有效检测出因地质变化引起的衬砌病害。地质雷达检测的准确性受多种因素影响,如介质的电磁特性差异、天线频率选择等,检测数据的分析处理对技术人员的专业水平要求较高,若分析不当,易造成误判。

2.3 光纤传感检测技术

光纤传感检测技术利用光纤的光学特性对铁路隧道衬砌的力学状态和病害信息进行感知。分布式光纤传感技术通过在隧道衬砌内或表面铺设光纤,当衬砌结构发生变形、开裂等变化时,会引起光纤局部应力、应变的改变,进而导致光纤中传输光的波长、强度、相位等光学参数发生变化。通过光时域反射(OTDR)、布里渊光时域分析(BOTDA)等技术对这些光学参数的变化进行监测和分析,可实现对衬砌结构应变分布的连续测量,精准定位病害位置,并量化病害程度。光纤传感技术具有高精度、长距离、分布式测量的特点,能够实时、在线监测隧道衬砌的健康状态,对微小变形和早期病害十分敏感,可提前预警潜在风险。光纤抗电磁干扰能力强,耐腐蚀,适合在恶劣的隧道环境中长期稳定工作。光纤的铺设和安装过程较为复杂,对施工工艺要求严格,且一旦光纤损坏,修复难度较大。目前该技术的设备成本和维护费用相对较高,在一定程度上限制了其大规模推广应用^[2]。

3 铁路隧道衬砌病害轻量化智能检测技术的发展趋势

3.1 多技术融合与协同检测

(1) 随着铁路隧道结构健康监测需求的复杂化,单一检测技术难以全面捕捉衬砌病害的特征信息,多技术融合成为必然趋势。基于激光扫描与探地雷达的协同检测,能够将激光扫描获取的隧道表面三维几何信息与探地雷达穿透衬砌内部的电磁波反射数据相结合,既实现对衬砌裂缝、剥落等表观病害的毫米级定位,又能精准探测衬砌背后空洞、不密实等隐蔽缺陷,构建从表面到内部的完整病害图谱。(2) 图像识别技术与声发射监

测的有机整合,进一步拓展了检测维度。高分辨率相机采集的衬砌表面图像通过深度学习算法自动识别裂缝形态,同时声发射传感器实时捕捉结构内部微损伤产生的应力波信号,二者数据经时空对齐与特征融合,可对病害发展趋势进行动态预测,有效提升病害诊断的时效性与准确性。(3)多源数据融合处理算法的持续优化,使不同检测技术产生的异构数据得以高效协同。通过建立统一的数据坐标系与特征提取模型,将地质雷达的电磁数据、超声波的声学数据以及红外热像的温度场数据进行多模态分析,不仅能够消除单一技术的检测盲区,还能挖掘病害特征之间的关联性,为铁路隧道衬砌病害的精准诊断与科学处治提供有力支撑^[3]。

3.2 智能化与自动化水平提升

(1)深度学习算法在铁路隧道衬砌病害检测领域的深度应用,推动检测技术向智能化方向迈进。基于卷积神经网络(CNN)的图像识别模型,能够自主学习衬砌裂缝、渗漏水等病害的纹理、形态特征,在复杂光照与污渍干扰下实现病害的高精度识别,检测准确率可达95%以上。循环神经网络(RNN)的引入使系统具备对病害时序数据的分析能力,可有效预测病害发展趋势。(2)自动化检测平台的构建大幅提升检测效率与数据处理能力。轨道式巡检机器人搭载多类型传感器,沿隧道轨道自主运行,通过惯性导航与视觉定位技术实现厘米级路径规划,自动完成衬砌表面与内部的多参数检测。检测数据经5G网络实时传输至云端,利用边缘计算与云计算协同处理,可在数小时内生成包含病害位置、类型、严重程度三维可视化检测报告。(3)智能决策系统的逐步完善,使检测结果与维护策略实现无缝对接。通过建立病害特征与维护措施的关联知识库,结合结构力学分析模型,智能系统能够依据检测数据自动评估衬砌结构安全等级,推荐合理的维修方案,如注浆加固、局部置换等,减少人工干预带来的主观性误差,推动铁路隧道养护从经验驱动向数据驱动转型。

3.3 轻量化与便携式设备研发

(1)为满足铁路隧道病害快速检测与应急处置需求,轻量化检测设备研发聚焦于传感器微型化与集成

化。采用微机电系统(MEMS)技术制造的惯性测量单元、超声波传感器,体积缩小至传统设备的1/10,重量减轻60%以上,同时保持高精度检测性能。通过将激光测距、高清摄像、红外热像等功能模块集成于手持式设备,检测人员可单人完成隧道表观病害的快速普查。

(2)低功耗设计与高效能源管理技术,进一步提升便携式设备的实用性。采用节能型ARM处理器与低功耗传感器,配合锂电池快充技术与能量回收系统,使设备续航时间延长至8小时以上。模块化设计理念允许用户根据检测需求灵活更换传感器模块,如在隧道渗漏水检测场景下,快速切换至高精度水分探测模块,提高设备的通用性与适应性。(3)轻量化设备的人机交互界面优化,显著降低操作门槛。基于触摸屏与语音提示的一体化操作界面,使检测人员无需复杂培训即可上手。设备内置的智能诊断软件支持实时数据可视化,通过三维点云重构与病害标注功能,检测结果以直观易懂的形式呈现,同时支持与PC端管理系统的数据同步,为铁路隧道养护决策提供便捷高效的数据支持^[4]。

结语

综上所述,铁路隧道衬砌病害轻量化智能检测技术研究对保障铁路运营安全意义重大。通过明晰病害类型及成因,深入剖析现有智能检测技术,揭示了多技术融合、智能化升级、设备轻量化的发展方向。这些成果为提升铁路隧道检测效率与准确性提供了理论依据与技术路径,推动了铁路基础设施检测技术的进步。未来,随着技术的不断创新,铁路隧道衬砌病害检测将向更高效、智能的方向发展。

参考文献

- [1]田阳,刘桂卫,崔庆国,等.铁路隧道衬砌病害轻量化智能检测技术研究[J].铁道工程学报,2025,42(2):85-90.
- [2]王鹤飞.铁路隧道衬砌病害处治技术研究[J].建筑技术,2025,56(6):707-710.
- [3]张晨,石峰,孟超,等.铁路隧道衬砌病害智能检测技术研究[J].铁道工程学报,2024,41(10):57-62.
- [4]高杰.铁路隧道衬砌病害整治若干问题的研究[J].建筑与装饰,2023(8):174-176.