

# 隧道衬砌背后空洞雷达图像特征识别与量化评估方法研究

金耀灿 吴雨晨 陈辉

浙江交工交通科技发展有限公司 浙江 杭州 310000

**【摘要】**：隧道衬砌背后空洞的识别与评估是确保隧道结构安全的重要环节。针对传统检测方法在精度、效率和主观性方面存在的不足，本文提出一种基于雷达图像特征的识别与量化评估方法。通过引入图像处理与模式识别技术，提取典型空洞特征模式，实现自动识别与分类。在此基础上，构建评估模型对空洞的规模与分布进行量化分析，提高检测结果的客观性与可操作性。实验证明，该方法在识别精度和定量评估方面具有显著优势，具备良好的工程适用性与推广价值。

**【关键词】**：隧道衬砌；空洞识别；雷达图像；图像特征；量化评估

DOI:10.12417/2811-0528.25.022.024

## 引言

隧道作为重要的交通基础设施，其运营安全直接关系到社会稳定与公众出行安全。衬砌背后的空洞问题长期以来是隧道病害的隐蔽隐患，若不能及时发现和准确评估，极易导致结构破坏甚至坍塌事故。目前，地质雷达在空洞检测中的应用日益广泛，但雷达图像的解读仍高度依赖人工经验，存在主观性强、识别效率低等问题。研究一种高效、准确的图像特征识别与量化评估方法，成为提升隧道结构健康监测水平的关键。本研究旨在通过技术创新，为空洞无损检测提供智能化解决方案。

## 1 隧道衬砌背后空洞雷达图像识别面临的关键问题

隧道衬砌背后空洞属于典型的结构隐蔽病害，在隧道长期服役过程中，常因地质松动、水文变化、施工缺陷或衬砌材料老化等因素引发。这类空洞通常隐藏在衬砌与围岩之间，直接影响衬砌结构的承载能力与整体稳定性。对其进行准确识别和量化评估，是保障隧道运营安全的重要前提。地质雷达作为一种非破坏性检测手段，因其能够获取地下电磁特征图像，在隧道病害探测中发挥了重要作用。然而，受限于复杂工况、雷达信号衰减及图像噪声干扰等问题，空洞在雷达图像中呈现出的反射特征往往不稳定、边界模糊，不仅影响识别的准确性，还容易引发漏判或误判等技术风险。

传统地质雷达图像分析高度依赖人工经验，操作者需基于多年的实地判读积累，从雷达图像中辨识异常信号区，并结合工程背景判断其对应病害类型。此类经验型方法存在较强主观性，不仅识别标准难以统一，结果的可重复性也较差。尤其在大范围巡检或多通道数据处理场景下，人工解读工作强度大、效率低，难以适应现代隧道运营对高效病害检测的实际需求。不同地质背景下的空洞雷达响应存在显著差异性，例如在强风化岩层和中风化岩层中，雷达信号反射形式、能量强度及穿透能力存在差异，进一步加剧了图像解读的不确定性。

在实际工程中，隧道所处环境往往具有高度复杂性，衬砌材料、电磁干扰、围岩含水率等多种因素共同影响雷达图像的成像质量。这使得空洞区域与其他异常区域（如脱空、渗水、蜂窝麻面等）之间的图像特征差异变得模糊，从而增加了图像识别的难度。仅依赖信号反射强度或形态进行判别已不足以满足高精度识别的需要，亟需构建一种基于多维图像特征融合的智能识别机制，以提升对复杂病害的分类判定能力，为后续量化分析与修复决策提供可靠依据。

## 2 融合图像特征的空洞识别与量化评估方法构建

为有效提升隧道衬砌背后空洞识别的自动化与精度水平，本研究基于雷达图像的高维数据结构，提出一种融合图像特征的空洞识别与量化评估方法。该方法首先通过图像预处理技术对原始雷达图像进行滤波去噪、增强对比和边缘校正，以优化图像质量，突出异常区域的特征响应。随后，结合空洞在雷达图像中的典型表现形态，如椭圆状强反射边界、双曲线波形等，提取多维图像特征参数，包括纹理、几何形态、反射能量分布及时延特性等，通过构建多尺度特征矩阵，对不同类型图像特征进行融合表征。这一过程显著增强了雷达图像的可解析性，为后续判别模型提供稳定的输入基础。

在识别模型构建方面，引入卷积神经网络（CNN）作为特征学习与判别核心，通过端到端训练方式实现图像特征自动提取与分类。模型训练过程中，基于标注数据集进行监督学习，空洞区域与非空洞区域在特征空间中形成可分离边界，提高识别的鲁棒性和适应性。为解决样本不平衡问题，还引入 SMOTE 过采样策略，增强模型对少数类病害的学习能力。识别结果输出为二值掩膜图像，能够准确标注出疑似空洞区域的位置、形态与边界特征。在模型训练完成后，系统可实现对大量雷达图像的快速批量处理，显著提高工程应用的效率。

在量化评估环节，构建空洞三维重建与数据转换模块，将识别结果与雷达发射参数、推进速度、介质传播速度等物理量

对应映射,进而计算空洞的深度、体积、分布密度等关键指标。为增强量化评估的工程可用性,引入统计校正因子对系统误差进行补偿,同时融合历史巡检数据对评估结果进行动态修正。该方法不仅提升了空洞识别的智能化水平,也增强了检测结果的结构性与量化性,为后续维修加固设计提供科学依据,满足隧道病害信息化管理的需求。

### 3 基于工程实例的识别评估方法效果分析

在实际工程应用中,将上述识别与评估方法部署于一处山区公路隧道段落,该区域地质背景较为复杂,隧道沿线多穿越岩层风化强烈、含水率高的构造带,地应力释放频繁,衬砌结构易出现病害累积。在现场检测过程中,通过多通道地质雷达布设测线,实现对衬砌背后空间电磁特征的高分辨率成像。图像数据经过滤波、增强、边缘锐化等一系列图像处理环节后输入至训练完成的空洞识别模型,该模型依赖多维图像特征进行自动学习与判别,在复杂背景下有效区分空洞与非结构性反射干扰。识别后生成的区域标注清晰、边界封闭,能够精准描绘异常区轮廓,充分体现了该方法在应对高复杂工况条件下的智能感知优势。

为确保识别准确性并评估模型在实际环境中的适应能力,工程团队选取若干典型区域开展多手段实地验证,采用钻芯法获取实体样本,并辅以声波法探测衬砌背后的空洞位置及延伸范围。经比对分析,识别结果与现场探测数据间具有高度一致性,说明该系统对空洞空间几何特征与反射模式具备良好学习与拟合能力。在此基础上,运用三维重建算法,将识别结果还原为空间实体模型,并与雷达发射路径、回波信号传播路径进行参数配准,实现空洞的空间定位与量化表征。基于量化数据构建结构有限元模型,用以模拟病害对衬砌结构内力分布的影响趋势,进一步判断其对隧道整体安全性能的潜在影响,增强检测结果的工程指导价值。如图1:



图1 隧道衬砌背后空洞检测作业现场

在面向多区域隧道巡检场景下,该方法具备良好的工程适配性和可扩展性。系统通过图像特征自动提取与模型化识别,大幅降低人工参与比例,有效克服了传统方法处理速度慢、重复性差等局限。在实际应用中,整套流程贯穿图像采集、预处理、识别判断、量化分析等多个技术环节,流程衔接紧密、稳定性高,具备跨区域作业能力。识别结果与时间序列数据联动构建病害演化数据库,便于管理方开展病害趋势分析、预警模型构建与养护策略优化。该识别与评估方法不仅提高了隧道运维智能化水平,也为未来构建具备自主判断与响应能力的数字化隧道提供了关键支撑。

### 4 结语

本文围绕隧道衬砌背后空洞的雷达图像特征识别与量化评估问题,构建了一套融合图像处理与智能判别的技术体系。通过结合图像特征提取、神经网络识别与三维量化分析,实现了对空洞病害的高效、客观与工程化评估。实际工程验证表明,该方法具有良好的识别准确性与应用适应性,为提升隧道结构健康监测的智能化水平提供了有效支撑。

### 参考文献:

- [1] 刘志锋,韩立峰.隧道衬砌病害检测与识别方法研究[J].岩土工程技术,2022,40(3):115-120.
- [2] 宋庆林,陈泽鹏.基于地质雷达图像的衬砌空洞自动识别技术[J].隧道与地下工程,2023,49(6):88-94.
- [3] 蒋思源,秦海东.隧道结构病害智能诊断方法及其工程应用[J].岩土力学,2021,42(9):2675-2683.