

公路桥梁结构病害智能检测技术与评估方法研究

郭乾国

新疆维吾尔自治区交通运输厅规划设计研究中心 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：公路桥梁结构病害智能检测融合传感、数据传输与人工智能算法，通过高精度传感器采集数据，经预处理、特征提取与模型识别病害。其检测技术分视觉、传感、无损三类，各有优势。评估方法体系含评估指标构建、模型建立与流程设计，指标全面且科学，模型多样。智能检测与评估关键技术环节包括数据预处理、特征提取与选择、模型优化与验证，这些环节能提升数据质量、精准评估，保障评估结果可靠，为桥梁养护提供科学依据。

关键词：公路桥梁；结构病害；智能检测技术；评估方法

引言：在交通基础设施建设中，公路桥梁占据关键地位，其安全状况关乎交通的顺畅与人民生命财产安全。然而，桥梁结构在长期运营中，受多种因素影响，易出现各类病害。传统检测评估方法存在效率低、精度差、依赖人工经验等不足。随着科技发展，公路桥梁结构病害智能检测与评估技术应运而生。它融合多学科前沿成果，涵盖智能检测技术原理、分类，病害评估方法体系，以及智能检测与评估的关键技术环节，为桥梁健康监测带来新变革，成为保障桥梁安全的重要手段。

1 智能检测技术的核心原理

公路桥梁结构病害智能检测技术作为桥梁健康监测领域的前沿技术，融合了现代传感技术、高速数据传输技术以及先进的人工智能算法。它能够针对桥梁结构的物理参数（如应力、应变、位移等）和外观特征（如裂缝、锈蚀、剥落等），开展自动化的信息采集、高效传输与深度分析工作，进而达成病害的智能化精准识别^[1]。

其核心原理在于巧妙运用各类高精度传感器，如光纤光栅传感器、应变片传感器等，精准捕捉桥梁结构在运营过程中出现的异常信号或外观细微变化。采集到的原始数据往往包含大量噪声干扰，需借助预处理技术进行净化，以提升数据质量。随后，运用特征提取算法，从海量数据中挖掘出与病害紧密相关的关键信息，如裂缝的宽度、长度、走向等特征参数。最终，借助预先训练好的识别模型，依据提取的特征信息，准确判断病害的类型（如结构性裂缝、非结构性裂缝等）和严重程度，为后续的桥梁结构评估工作提供坚实可靠的数据基础，有效摆脱了传统检测方法对人工经验的过度依赖。

2 公路桥梁结构病害智能检测技术分类

2.1 视觉检测技术

视觉检测技术作为公路桥梁结构病害智能检测的关键手段之一，主要借助摄像头、无人机等先进设备，精

准获取桥梁结构表面的图像或视频数据，并依托图像处理与模式识别算法达成病害识别目标。在实际应用中，该技术能够清晰、直观地捕捉桥梁表面诸如裂缝、剥落、露筋等典型病害特征。其具体操作流程为，先对获取的图像进行灰度处理，将彩色图像转化为灰度图像，以简化后续分析；接着运用边缘检测算法，精准定位病害边缘；再通过形态学分析，进一步提取病害的几何参数，如长度、宽度、面积等，以及形态特征，如裂缝走向、剥落形状等。基于这些特征信息，可实现对病害的精准定位与细致分类。视觉检测技术具备操作便捷、检测范围广泛、非接触式检测等诸多优势，尤其适用于桥梁梁体、桥墩、桥面等部位的表面病害检测，能快速获取大面积结构的病害信息，为后续的桥梁结构评估提供直观且可靠的数据支撑。

2.2 传感检测技术

传感检测技术是公路桥梁结构病害智能检测体系中的核心环节。它通过在桥梁结构的关键受力部位与易损区域，科学合理地布设各类高精度传感器，实现对结构应力、应变、位移、振动等关键物理参数的实时、连续采集。这些参数犹如桥梁结构的“健康密码”，能够精准反映结构在不同工况下的力学响应与状态变化。（1）常用的传感器类型丰富多样，应变片可精确测量结构局部的微小应变；加速度传感器能有效捕捉结构的振动特性；位移传感器能实时监测结构的位移变化；光纤传感器则凭借其抗电磁干扰、耐腐蚀等优势，适用于复杂环境下的长期监测。（2）通过对传感器采集到的海量时序数据进行深度分析，可敏锐识别结构内部的隐性病害，如混凝土内部的细微裂缝、钢结构的疲劳损伤等，这些病害往往隐藏于结构内部，难以通过视觉检测直接察觉。传感检测技术凭借其实时性强、检测精度高、可反映结构内部状态等显著特点，为桥梁结构的动态监测与

病害预警提供了坚实可靠的技术支撑。

2.3 无损检测技术

无损检测技术作为公路桥梁结构病害检测的关键手段,其突出优势在于能在不损害桥梁结构原有性能的基础上,借助物理场与结构材料间的复杂相互作用,精准检测结构内部潜藏的病害与缺陷。(1)常见的无损检测技术类型多样,各具特色。超声波检测技术,依据声波在结构内部传播时速度的改变以及衰减程度,准确判断是否存在裂缝、空洞等缺陷,对于混凝土内部细微损伤的识别尤为有效。雷达检测技术利用电磁波的反射信号,深入分析桥面铺装层厚度、内部空洞及脱空等状况,为桥面质量评估提供关键数据。红外热成像检测技术则通过捕捉结构表面的温度差异,敏锐识别混凝土内部的含水率变化、裂缝等病害,尤其适用于检测隐蔽部位的异常情况。(2)无损检测技术凭借其精准探测结构内部病害的能力,有效弥补了视觉检测与传感检测在内部缺陷识别方面的短板,为全面、深入地掌握桥梁结构状态提供了坚实可靠的技术保障,在桥梁健康监测中发挥着不可或缺的作用^[2]。

3 公路桥梁结构病害评估方法体系

3.1 评估指标构建

评估指标构建作为公路桥梁结构病害评估的基石,其重要性不言而喻。在构建过程中,需紧密结合桥梁结构类型,如梁桥、拱桥、悬索桥等各自的结构特性;充分考虑病害特点,像裂缝、剥落、锈蚀等不同病害的表现形式;同时依托检测数据,确保指标选取有坚实的数据支撑。评估指标应全面涵盖病害特征指标与结构性能指标。病害特征指标聚焦于直接反映病害程度的参数,如病害类型能明确病害的种类归属,病害面积可量化病害的影响范围,裂缝长度与宽度能精准描述裂缝的严重程度,缺陷深度则能揭示结构内部的损伤状况。结构性能指标则着眼于反映结构整体性能,承载能力体现结构承受荷载的能力,刚度反映结构抵抗变形的能力,稳定性关乎结构在各种作用下的平衡状态,耐久性预示结构在长期使用过程中的抗劣化能力。指标选取遵循科学性、针对性与可操作性原则,经量化处理后形成标准化评估指标体系,保障评估结果可靠。

3.2 评估模型建立

评估模型作为公路桥梁结构病害评估体系的核心工具,依托已构建的评估指标体系,运用数学方法与严谨逻辑推理,达成对桥梁结构病害状态的全面、综合评估。依据不同的评估需求,可灵活选用多种评估方法构建模型。层次分析模型将复杂的评估目标逐级拆解为目

标层、准则层与指标层,通过科学确定各指标的权重,实现多因素协同的综合评估,使评估过程条理清晰、层次分明。模糊综合评价模型则着重应对评估过程中存在的模糊性问题,借助模糊数学方法,巧妙地将定性指标与定量指标有机融合,从而实现对病害状态的模糊判断,有效处理评估中的不确定性。神经网络评价模型利用先进的机器学习算法,通过大量训练样本的学习,精准把握指标与评估结果之间的内在映射关系,进而实现对未知样本的高精度评估。评估模型建立时,需全面考量各类指标的影响程度,确保模型能客观、真实地反映桥梁结构的病害状态与性能水平^[3]。

3.3 评估流程设计

评估流程严格遵循“数据输入—指标分析—模型计算—结果输出”的清晰逻辑顺序,以此保障评估过程具备高度的规范性与系统性。在流程起始阶段,需对智能检测技术所获取的病害数据以及结构参数数据进行全面且细致的整理。这些数据涵盖了桥梁结构多方面的信息,是评估工作的重要基础输入。接着,依据预先构建的评估指标体系,对输入的数据展开深入分析处理。这一过程中,要精准计算各指标的实际数值,并完成归一化处理,消除不同指标间量纲的影响,使数据更具可比性。随后,将处理完备的指标数据代入精心建立的评估模型,借助模型强大的计算能力,得出综合评估结果。最后,对评估结果进行专业解读,清晰明确桥梁结构的病害程度、具体影响范围以及整体结构性能状态,为后续科学合理的养护决策提供坚实有力的依据。整个评估流程设计注重各环节紧密衔接与协同配合,确保数据传递精准无误、评估过程高效顺畅。

4 智能检测与评估的关键技术环节

4.1 数据预处理技术

数据预处理是智能检测与评估流程中极为关键的前提步骤,其核心是精准剔除原始数据里的噪声、误差等干扰因素,提升数据质量,为后续分析提供可靠基础。(1)在视觉检测领域,图像数据易受光照、设备、拍摄角度等影响,质量参差不齐。如某大型桥梁视觉检测项目,因光照不均,部分图像噪声点占比达15%,严重影响质量。对此,可采用图像去噪算法,像中值滤波、高斯滤波等,经实验,中值滤波可使噪声点占比降至3%以内;通过灰度校正调整灰度分布,能提升图像对比度40% - 60%;借助几何校正修正图像变形,某案例中几何变形误差从8%降至1%以内。(2)对于传感检测与无损检测获取的数值数据,也需细致处理。数据平滑算法,如移动平均法、指数平滑法,可减少随机波动,某

桥梁应力监测数据经移动平均法处理后，波动幅度降低30%；异常值剔除方法，如阈值法、箱线图法，能识别并去除异常值，某项目用箱线图法剔除5%异常值；数据归一化可将不同量纲数据统一，处理后数据标准差可控制在0.1以内。数据预处理技术通过这些算法优化原始数据，为后续环节筑牢根基，影响检测与评估结果的准确可靠。

4.2 特征提取与选择技术

特征提取与选择技术在智能检测与评估中起着承上启下的关键作用，是连接检测数据与评估模型的重要纽带。其核心是从预处理后的数据中挖掘能表征病害特征与结构状态的关键信息，为精准评估提供支撑。（1）针对不同类型检测数据，需定制适配的特征提取算法。以图像数据为例，纹理特征提取算法可捕捉病害区域纹理变化，如某桥梁图像检测中，对裂缝粗糙度特征的识别准确率超90%；形状特征提取算法能精准描述病害几何形状，相关实验里对裂缝长度测量误差控制在5%以内。对于数值数据，时域特征提取算法可分析数据随时间变化规律，如某桥梁应力监测中，准确捕捉应力波动特征；频域特征提取算法能将数据转换到频域，揭示频率成分，经分析成功发现某桥梁结构异常频率，识别准确率达85%。（2）特征选择技术如同“数据精炼师”，通过科学筛选剔除冗余与无关特征，保留关键特征。这不仅能降低模型计算复杂度、提高评估效率，还能避免模型过拟合，提升评估准确性与可靠性。相关实验表明，合理特征选择可使模型计算复杂度降低40%-60%，过拟合概率从30%降至10%以内，让评估结果更贴近桥梁实际病害状态^[4]。

4.3 模型优化与验证技术

模型优化与验证技术在智能检测与评估中，是保障评估结果精准可靠的关键，旨在提升评估模型性能，增强其可靠性与泛化能力，以应对复杂实际状况。（1）在模型优化方面，主要通过调整参数、改进算法结构实现。以神经网络模型为例，调整神经元数量、层数及

学习率等参数，可优化模型对数据的拟合，提高预测精度。如某桥梁病害评估模型，将神经元数量从50个增至80个，层数从3层加至5层，学习率从0.01调至0.005，预测准确率从75%提升至88%。同时，改进算法结构，引入新网络层或优化计算方式，也能提升模型性能。（2）模型验证环节，需精心挑选与训练数据集相互独立的测试数据集，以保证结果客观性。运用准确率、召回率、均方误差等指标，对优化后的模型进行全面性能测试。如某桥梁结构病害评估模型验证，选用含200组数据的独立测试集，测试显示准确率达92%，召回率达88%，均方误差控制在0.05以内。通过反复优化与验证，使模型适应不同桥梁结构和病害特点，为桥梁养护提供科学决策依据。

结束语

公路桥梁结构病害的智能检测与评估是一项系统性、综合性的复杂工程。智能检测技术融合多学科前沿成果，为病害识别提供丰富数据；评估方法体系构建科学指标、建立精准模型、设计规范流程，实现病害状态全面评估。关键技术环节中，数据预处理净化数据，特征提取与选择挖掘关键信息，模型优化与验证保障评估精准可靠。这些环节紧密配合、相辅相成，共同构建起公路桥梁结构病害智能检测与评估的坚实框架，为桥梁安全运行提供有力保障，推动桥梁健康监测领域朝着智能化、精准化方向持续发展。

参考文献

- [1]田青业.公路桥梁工程的常见病害及施工处理技术研究[J].建筑机械,2022(05):20-23.
- [2]张卫兵.公路桥梁工程的常见病害及施工处理技术分析[J].建筑技术开发,2021,48(14):140-142.
- [3]李涛.桥梁工程的常见病害与施工处理技术研究[J].交通世界,2021(20):142-143.
- [4]刘洋.公路桥梁结构病害超声检测技术的应用与发展[J].建筑技术开发,2022,46(12):112-113.