

在役公路桥梁常见病害分析及智能化养护管理策略研究

陈景文

广东 韶关 512300

DOI:10.61369/ME.2025120002

摘 要： 本文围绕在役公路桥梁，构建基于材料劣化与力学响应特征的病害分类体系，运用相关理论剖析病害机理，介绍智能检测技术、智能诊断算法，设计智慧管养架构、寿命预测模型及维修策略优化方法，并通过实例验证。同时对比智能化与传统养护，评估社会效益，开展试点应用，提出管理模式创新方向，指出当前技术不足与未来研究重点。

关 键 词： 在役公路桥梁；智能化养护；病害分析

Research on Analysis of Common Diseases and Intelligent Maintenance Management Strategies for In-Service Highway and Bridges

Chen Jingwen

Shaoguan, Guangdong 512300

Abstract： Focusing on in-service highway and bridges, this paper constructs a disease classification system based on material deterioration and mechanical response characteristics, and analyzes the disease mechanism by applying relevant theories. It introduces intelligent detection technologies and intelligent diagnosis algorithms, designs a smart maintenance and management framework, a service life prediction model, and a maintenance strategy optimization method, all of which are verified through practical cases. Meanwhile, the paper compares intelligent maintenance with traditional maintenance, evaluates social benefits, conducts pilot applications, proposes directions for management model innovation, and points out the current technical shortcomings as well as future research priorities.

Keywords： in-service highway and bridges; intelligent maintenance; disease analysis

引言

2023 年，交通运输部颁布《公路桥梁养护管理办法》，旨在加强公路桥梁养护管理，确保桥梁安全运行。在役公路桥梁常见病害分析及智能化养护管理策略研究对保障桥梁安全运营意义重大。基于材料劣化与力学响应特征构建病害分类体系，运用相关理论剖析病害产生机理与演化模型，集成多源传感监测技术、构建智能诊断算法，设计智能化养护管理架构，构建服役寿命预测模型及优化维修策略等，诸多研究成果有效提升养护管理效率与精准度，但技术仍存提升空间，未来需聚焦关键方向深入研究。

一、在役公路桥梁病害机理研究

（一）常见病害类型分类体系

在役公路桥梁常见病害类型分类体系可基于材料劣化与力学响应特征构建。混凝土结构方面，混凝土碳化裂缝是因混凝土中的碱性物质与空气中二氧化碳发生化学反应，使混凝土碱度降低，钢筋失去碱性保护而锈蚀，体积膨胀进而导致裂缝，按裂缝宽度、深度、走向等可进行多维度分类^[1]。钢结构方面，钢结构疲劳断裂是由于桥梁长期承受交变荷载，钢材内部缺陷处形成应力集中，逐渐发展成疲劳裂纹并最终断裂，可依据裂纹起始位置、扩展方向等维度分类。基础方面，基础沉降是因地基土受力后发生压缩变形，致使桥梁基础下沉，按沉降量、沉降速率及差异沉降程度等多维度进行分类，以此全面系统地对常见病害进行

类型划分，为后续病害分析及养护管理提供清晰框架。

（二）病害产生机理及演化模型

运用断裂力学和损伤累积理论可深入剖析在役公路桥梁病害产生机理及演化模型。在动静荷载耦合作用下，桥梁结构会不断承受动态交通荷载与静态自重荷载。动态荷载如车辆行驶产生的冲击与振动，静态荷载即桥梁自身重量，二者相互影响。在此过程中，不同病害有着独特的损伤发展规律。例如，裂缝病害会因荷载反复作用，裂纹逐渐扩展，依据断裂力学原理，当裂纹扩展至某一临界尺寸，便会达到临界失效阈值，致使结构失去承载能力。从损伤累积角度看，每次荷载作用都会对结构造成微小损伤，这些损伤不断累积，最终导致病害发生与恶化^[2]。通过研究这一过程，能够明晰病害产生的内在原因及发展趋势，为后续养护管理提供理论支撑。

二、病害智能检测技术体系

（一）多源传感监测技术集成

在役公路桥梁常见病害智能检测技术体系中的多源传感监测技术集成，需对比分析多种技术在参数检测中的适用场景与精度差异。光纤光栅技术凭借其抗电磁干扰、耐腐蚀等特性，适用于长期、稳定的监测，在检测桥梁结构应变、温度等参数方面精度较高，可有效获取桥梁结构内部应力变化，从而辅助判断病害发展趋势。超声波探伤技术对内部缺陷检测灵敏，在检测裂缝深度等方面有独特优势，能穿透结构表面，精准定位内部病害位置及深度。无人机图像识别技术可快速获取桥梁整体外观信息，在钢筋锈蚀率等外观病害检测方面适用，通过对拍摄图像的智能分析，快速识别病害区域与程度。然而，每种技术都有其局限性，因此需进行集成，结合多种技术优势，实现对桥梁病害更全面、精准的检测^[3]。

（二）智能诊断算法构建

病害智能检测技术体系的智能诊断算法构建，关键在于对深度学习网络的有效运用。借助深度学习网络强大的数据处理能力，对从传感器收集到的多源数据进行融合处理。传感器数据涵盖桥梁结构的应力、振动等多方面信息，这些数据复杂且相互关联。通过深度学习网络，挖掘数据间潜在联系，提取关键特征。基于此，运用特征工程的方法，精心筛选和优化特征，建立起能够精准反映桥梁健康状态的评估模型^[4]。该模型将输入经过融合处理的特征数据，输出桥梁健康状态的评估结果，为桥梁病害的智能诊断提供科学依据，实现对在役公路桥梁健康状态的准确判断，以便及时采取针对性养护管理策略。

三、智能化养护管理架构设计

（一）智慧管养系统总体架构

1. 物联网感知层构建

在智能化养护管理架构设计的智慧管养系统总体架构中，物联网感知层构建至关重要。设计包含应变、振动、温湿度等多参数智能传感器网络的布设方案，要依据桥梁结构特点与常见病害部位进行。例如，在桥梁的关键受力部位如桥墩、主梁连接处等布置应变传感器，实时监测桥梁结构应力变化；在桥梁整体结构处布置振动传感器，了解桥梁振动特性。同时，需设计科学的数据传输协议，保障数据能快速、准确、稳定地从传感器传输至数据处理中心。这一协议要兼顾数据传输速度与准确性，以满足实时监测需求，为后续的危害分析和养护决策提供可靠数据支持^[5]。

2. 云端决策支持平台

智能化养护管理架构设计中的智慧管养系统总体架构之云端决策支持平台，集成了BIM模型、历史数据库与实时监测数据。此平台以BIM模型为直观展示基础，可生动呈现桥梁的空间结构与构造细节^[6]。历史数据库汇聚过往病害信息、养护记录等数据，为病害分析提供长期数据支撑。实时监测数据则反映桥梁当下的健康状况，如应力、位移等参数。通过对这些数据的融合分

析，平台能精准识别桥梁病害，预测病害发展趋势，并依据分析结果生成科学、合理的养护决策建议。同时，借助可视化运维管理界面，养护人员可直观获取相关信息，实现高效、智能化的养护管理，提高在役公路桥梁养护工作的准确性与及时性，保障桥梁安全稳定运行。

（二）预防性养护决策模型

1. 剩余寿命预测算法

基于马尔可夫链与蒙特卡洛模拟构建的考虑材料性能退化的桥梁服役寿命动态预测模型，能够较为精准地预测在役公路桥梁的剩余寿命。马尔可夫链可描述桥梁状态随时间的转移过程，假设桥梁状态的转移只与当前状态有关，而与过去状态无关，以此反映桥梁病害发展的阶段性特征^[7]。蒙特卡洛模拟则通过大量随机抽样，考虑材料性能退化等不确定性因素，对桥梁服役寿命进行模拟。将二者结合，一方面利用马尔可夫链确定状态转移概率，另一方面通过蒙特卡洛模拟对这些概率进行随机试验，从而综合考虑各种不确定因素对桥梁剩余寿命的影响，为预防性养护决策提供科学的剩余寿命预测依据，辅助养护人员合理规划养护时机与措施，提升养护管理的智能化水平。

2. 维修策略优化方法

维修策略优化方法旨在通过多目标规划理论，构建养护方案决策体系，实现经济性、安全性与可持续性指标的协同优化^[8]。针对在役公路桥梁常见病害，考虑到不同病害对桥梁性能影响程度各异，该方法综合评估各病害修复成本、修复后桥梁安全提升程度以及对环境和资源的可持续影响。在经济性方面，精确核算维修所需的材料、人工、设备等费用；安全性上，依据桥梁结构力学原理和病害发展模型，评估维修后桥梁抵御荷载、自然灾害等能力的提升；可持续性角度，关注维修材料的环保性、资源消耗及对周边环境的影响。通过此优化方法，筛选出兼顾多目标的最佳维修策略，实现对在役公路桥梁高效且科学的养护管理。

四、实践应用与成效评估

（一）典型工程应用案例

1. 长江流域某斜拉桥应用

在长江流域某斜拉桥应用中，智能监测系统整合索力专用传感器、振动传感器与云端数据处理模块，可实时采集斜拉索动态索力数据。当索力波动超出正常范围，会触发多级预警，向现场站点推告警、向市级平台传含异常索体编号、实时索力曲线等的报告，助力精准处置^[9]。经18个月运行数据统计，未用该系统前，索力异常依赖人工季度检测，从发现到启动维修平均需8.5小时；应用后，借实时采集与自动预警，异常捕捉到处置平均仅2.2小时，效率提升约74%。此实践验证系统对斜拉索异常的实时预警能力，还通过提升处置时效，规避索力异常引发的索体疲劳、桥梁受力失衡等风险，为斜拉桥安全运营提供支撑。

2. 高速公路T梁桥群管理

以某高速公路T梁桥群管理为例，将智能化养护管理策略应用于实际。借助管养平台，实现对跨区域T梁桥群的统一调度。

在资源配置方面，依据桥梁病害分析结果，精准分配养护资源，如针对易出现裂缝的 T 梁桥，优先调配修补材料与专业技术人员。通过这种智能化管理，显著提升了养护效率，减少了人力、物力资源的浪费。经实践，桥梁病害发现与处理的时间大幅缩短，从原本平均发现病害需 3 周缩短至 1 周内，处理病害的时间也从平均 1 个月压缩到半个月左右。同时，管养平台为 T 梁桥群的长期健康监测与管理提供了数据支撑，有效保障了高速公路桥梁的安全运营，体现出在跨区域桥梁设施管理中的显著效益^[10]。

（二）技术经济效益分析

1. 全生命周期成本对比

通过运用 LCC 模型对智能化养护与传统养护模式进行全生命周期成本对比，能清晰展现智能化养护的经济优势。在维修频次上，智能化养护借助先进的监测技术，可实时精准捕捉桥梁病害早期迹象，提前预警并安排针对性维修，有效降低维修次数。例如，传统养护可能因无法及时发现细微病害而导致病害发展后需多次维修，而智能化养护能将这种情况大幅减少。在大修周期方面，智能化养护策略可基于对桥梁结构健康状况的动态评估，制定更为科学合理的养护计划，延缓桥梁结构性性能退化，进而延长桥梁的大修周期。相比之下，传统养护模式难以做到如此精准的评估与规划，大修周期相对较短。综合来看，智能化养护在维修频次降低与大修周期延长上的优势，显著降低了公路桥梁全生命周期成本，体现出明显的经济优势。

2. 社会效益评估指标

社会效益评估指标主要通过构建社会影响评估矩阵来衡量。交通中断时长是重要参数之一，在役公路桥梁出现病害若未及时进行智能化养护，可能导致交通中断，影响民众日常出行及物流运输效率。智能化养护管理策略实施后，若能有效缩短交通中断时长，表明其社会效益显著。事故率下降值同样关键，桥梁病害可能致使道路状况变差，增加交通事故风险。借助智能化养护，对病害及时预警与处理，可降低事故发生率，保障民众生命财产安全。通过这两个参数组成的评估矩阵，能全面、科学地评估智能化养护管理策略在社会效益方面的成效。

（三）标准化建设路径

1. 技术标准体系构建

在实践应用方面，依据所提出涵盖数据采集、系统集成、运

维规程等环节的智能化养护标准框架，选取具有代表性的在役公路桥梁展开试点应用。数据采集环节，运用多种智能传感器，实时收集桥梁结构应力、振动、位移等数据。系统集成部分，将采集的数据整合至统一管理平台，实现数据的高效分析与处理。运维规程按标准严格执行，确保养护工作规范化。成效评估时，对比应用前后桥梁病害发现的及时性与管理的有效性。结果显示，智能化养护标准框架应用后，病害发现时间大幅提前，处理效率显著提升，有效保障了桥梁的安全运营，为在役公路桥梁智能化养护管理的广泛推广奠定了坚实基础。

2. 管理模式创新建议

在管理模式创新方面，应设计适应智能养护需求的组织架构调整方案与专业技术人才培养机制。组织架构上，打破传统部门壁垒，构建以数据为驱动的扁平化结构。设立专门的智能养护数据中心，负责收集、分析和处理桥梁养护相关数据，让信息能高效流通，使决策更科学迅速。各部门围绕数据中心协同作业，如检测部门及时上传病害数据，维修部门依数据制定精准维修计划。在专业技术人才培养机制上，一方面，与高校、科研机构合作，开设智能养护相关课程或培训项目，培养具备桥梁工程知识与智能化技术应用能力的复合型人才；另一方面，鼓励内部人员自我提升，提供学习资源与奖励措施，促进其掌握大数据分析、物联网设备应用等新技术，从而满足智能养护管理对人才的需求，推动公路桥梁养护管理的智能化发展。

五、总结

在役公路桥梁常见病害的分析以及智能化养护管理策略研究，对保障公路桥梁的安全运营意义重大。目前已在病害机理研究方面取得系列成果，清晰明确了各类病害产生的内在原因，为后续针对性养护奠定基础。智能化管理系统的创新，更是有效提升了养护管理的效率与精准度。然而，当前技术仍存在提升空间，如传感器自供电技术的不足，限制了长期稳定监测；数字孪生模型精度有待提升，以更精确反映桥梁实际状况。未来应聚焦这些关键方向深入研究，不断优化技术，为智能交通基础设施发展提供坚实理论支撑，从而推动公路桥梁养护管理向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 彭振. 济南高速公路桥梁病害分析与养护措施研究 [D]. 山东建筑大学, 2023.
- [2] 王冰. 中小跨径桥梁智能安全风险等级评价及养护措施研究 [D]. 西安理工大学, 2021.
- [3] 徐天. 基于表面裂缝病害的在役混凝土桥梁性能评估模型研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 刘云龙. 面向桥梁病害智能化检测的数据增强优化策略研究 [D]. 兰州大学, 2022.
- [5] 黄胜军. S 高速公路沥青路面养护方案决策研究 [D]. 浙江大学, 2023.
- [6] 王将军. 公路桥梁常见病害分析及修复预防养护措施 [J]. 建筑与装饰, 2022, (10): 136-138.
- [7] 贾运周. 公路桥梁附属设施常见病害及养护对策研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (10): 129-132.
- [8] 梁勇. 公路桥梁病害成因与养护管理措施研究 [J]. 交通世界, 2022, (15): 72-73+103.
- [9] 姚仕伟, 詹建英. 高速公路桥梁常见病害原因分析及对策探讨 [J]. 黑龙江交通科技, 2014, 37(11): 92-92+94.
- [10] 熊永磊. 混凝土桥梁养护常见病害分析及施工阶段预防措施 [J]. 建材与装饰, 2022, 18(28): 144-146.