

基于无人机技术的桥梁结构健康监测与评估方法研究

潘文军

湖北楚晟科路桥技术开发有限公司, 湖北省襄阳市, 441100;

摘要: 随着交通基础设施的快速发展, 桥梁作为连接各地的关键通道, 其结构健康与安全日益受到重视。本文旨在探讨基于无人机技术的桥梁结构健康监测与评估方法, 以为桥梁的维护管理提供科学依据。

关键词: 无人机技术; 桥梁结构; 健康监测; 评估方法

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 03. 012

1 无人机技术在桥梁监测中的应用

1.1 无人机技术的基本原理

无人机技术的基本原理主要依赖于其核心组成部分, 包括飞行控制系统、导航系统、传感器以及通信系统。这些组成部分共同协作, 使无人机能够在空中稳定飞行并执行特定任务。

(1) 飞行控制系统是无人机的“大脑”, 负责处理来自传感器的实时数据并控制无人机的飞行姿态。该系统通常包括陀螺仪、加速度计和气压计等传感器, 能够实时监测无人机的姿态和高度。通过复杂的算法, 飞行控制系统能够确保无人机在风速变化、气流扰动等复杂环境中保持稳定飞行。

(2) 导航系统则是无人机确定自身位置和航向的关键。大多数无人机配备全球定位系统 (GPS), 通过卫星信号实时获取位置信息。此外, 惯性导航系统 (INS) 可以在 GPS 信号弱或失效的情况下, 依靠内部传感器进行位置估算。结合这两种导航方式, 无人机能够实现高精度的定位与导航。

(3) 传感器是无人机获取环境信息的重要工具。对于桥梁监测, 无人机通常配备高清摄像头、红外传感器以及激光雷达等设备。这些传感器能够捕捉桥梁的图像、热分布及三维形态, 从而为后续的数据分析提供原始素材。

(4) 通信系统负责无人机与操作人员之间的信息传递。通过无线电信号, 无人机能够将实时数据传回地面, 同时接收操控指令。现代无人机多采用 4G/5G 网络或 Wi-Fi 技术, 确保数据传输的快速与稳定。

1.2 无人机在桥梁监测中的优势

无人机在桥梁监测中的优势主要体现在以下几个方面:

(1) 无人机具备高效的作业能力, 能够在短时间

内完成大面积的桥梁监测任务。传统的桥梁检测往往需要人工攀爬或使用大型设备, 耗时耗力且存在一定的安全隐患。无人机能够快速飞行并获取高分辨率的图像和视频资料, 极大地提高了检测效率。某些无人机在一次飞行中可以覆盖数千平方米的桥面, 能够在几分钟内完成传统检测团队数小时甚至数天的工作。

(2) 无人机提供了更为灵活的监测方式。无人机可以在各种复杂的环境条件下作业, 包括高空、狭窄或危险的区域。通过调整飞行高度和角度, 无人机能够获取不同视角下的图像数据, 使得对桥梁结构的全面评估变得更加简单。特别是在一些难以接近的桥梁部位, 利用无人机的优势可以有效避免人工检测带来的风险。

(3) 无人机监测能够实现高精度的数据采集。现代无人机配备了高性能的摄像头和传感器, 能够捕捉到微小的结构变化和损伤。利用红外成像技术, 无人机可以识别桥梁材料的温度差异, 从而发现潜在的结构缺陷。通过这种方式, 监测的准确性和可靠性显著提高。

(4) 数据的实时传输和处理能力也是无人机监测的一大优势。无人机在飞行过程中可以实时传输数据至地面站, 监测人员可以即时分析和评估桥梁的健康状况。结合人工智能和机器学习技术, 可以实现自动化的数据处理和损伤识别, 进一步提升了监测效率。

(5) 无人机监测具有较低的成本。相较于传统检测方法, 使用无人机进行桥梁监测的设备投入和维护费用相对较低。无人机的操作和维护相对简单, 减少了对专业技术人员的需求, 降低了人力成本。同时, 频繁的监测和评估能够早期发现潜在问题, 从而减少后期的维修费用, 具有良好的经济效益。

2 基于无人机技术的桥梁结构健康监测方法

2.1 多模态数据采集与协同

无人机在桥梁监测中的应用依赖于多类型传感器

的协同作业,通过多维数据整合实现对桥梁结构的全面感知。高清摄像头作为基础视觉设备,能够捕捉桥梁表面的微观损伤,如混凝土剥落、钢筋锈蚀或裂缝扩展,其高分辨率特性使得毫米级缺陷亦能被清晰记录。红外热成像传感器则通过非接触式测温,揭示桥梁内部潜在隐患,例如因渗水导致的温度异常区域或材料老化引起的热传导差异。激光雷达(LiDAR)通过发射激光脉冲并接收反射信号,生成高精度三维点云模型,量化桥梁的几何形变与整体刚度衰减。这些传感器的同步运行不仅覆盖了桥梁的物理形态特征,还结合了热力学与环境响应数据,形成多维度信息网络。数据采集过程中,无人机通过智能路径规划技术自主调整飞行高度与角度,确保传感器覆盖桥梁关键部位,同时避免盲区。多模态数据的融合进一步借助时间同步算法与空间配准技术,消除传感器间的时空偏差,为后续分析提供一致、完整的底层数据支撑。

2.2 高分辨率图像预处理与增强

原始图像数据的质量直接影响损伤识别的准确性,因此预处理与增强环节成为监测流程的关键步骤。针对无人机在飞行中可能受到的环境干扰,如光照不均、雾气遮挡或设备抖动,需采用自适应滤波算法进行去噪处理,并利用直方图均衡化技术增强图像对比度,突出结构细节。几何校正则通过特征点匹配与仿射变换,消除因无人机视角倾斜或镜头畸变导致的图像失真。对于复杂背景下的桥梁特征提取,基于深度学习的语义分割模型能够精准区分结构主体与周边环境,例如分离桥面与植被、水体等干扰元素,大幅减少冗余数据量。此外,多视角图像的拼接技术通过特征点检测与全局优化算法,将局部图像无缝整合为全景视图,为桥梁整体状态评估提供直观依据。预处理后的图像数据不仅提升了解析效率,还为后续自动化分析奠定了高质量的数据基础。

2.3 实时数据传输与云端协同

无人机采集的海量数据需通过高效通信链路实现实时传输与云端协同管理。采用4G/5G网络或专用无线通信协议,无人机能够将高分辨率图像、热成像数据及点云模型实时回传至地面控制中心。云端平台通过分布式存储架构对数据进行分类存储,支持多用户并发访问与快速检索,同时利用冗余备份机制确保数据安全性。在传输过程中,边缘计算节点部署于无人机或地面站,对原始数据进行初步筛选与压缩,例如剔除重复帧或低价值图像,仅保留关键信息上传至云端,显著降低带宽

压力与存储成本。端-边-云协同模式下,云端算法可动态调整无人机任务指令,例如针对异常区域触发二次精细扫描,形成“感知-分析-响应”的闭环流程。这种分层处理机制不仅提升了数据流转效率,还通过权限加密与区块链技术保障了监测数据在传输与存储中的防篡改性。

2.4 基于深度学习的损伤自动识别

深度学习技术的引入使得桥梁损伤识别从人工判读迈向自动化与智能化。卷积神经网络(CNN)作为核心模型,通过多层特征提取结构学习损伤的纹理、形状与分布规律。训练阶段采用大量标注数据,涵盖裂缝、锈蚀、空洞等典型损伤类型,使模型具备高精度分类能力。针对桥梁材质多样性与环境复杂性,迁移学习技术将预训练模型适配至特定场景,例如通过微调网络参数适应钢桥与混凝土桥的差异化特征。实际应用中,模型对预处理后的图像进行逐像素分析,输出损伤概率热力图,并结合非极大值抑制算法定位损伤边界。对于模糊或低对比度区域,引入注意力机制增强模型对细微特征的敏感度。检测结果通过可视化界面呈现,支持人工复核与标注修正,形成人机协同的混合增强智能模式。此外,模型定期通过增量学习更新知识库,适应桥梁老化过程中损伤模式的动态演变,确保长期监测的可靠性。

2.5 多源数据融合与动态更新

桥梁健康状态的精准评估需依赖多源数据的深度融合与持续更新。通过贝叶斯网络或证据理论等融合算法,将图像、热成像与三维点云数据整合为统一的数字化孪生模型。该模型不仅复现桥梁的几何形态与材质属性,还嵌入物理力学参数与环境影响因素,实现虚实映射。数据融合过程中,时空对齐技术消除传感器采集的时间差与空间偏移,确保多源信息在统一坐标系下的精确匹配。数字化孪生模型支持动态更新机制,每次监测任务后自动对比历史数据,识别新增损伤或既有损伤的扩展趋势。例如,通过点云配准技术量化桥墩沉降量,或利用热成像时序数据追踪渗水区域的扩散范围。融合后的数据还可输入预测模型,评估结构性能退化的潜在路径,为预防性维护提供决策依据。这种动态化、持续化的数据管理策略,使得桥梁健康监测从静态快照升级为全生命周期跟踪,显著提升运维管理的主动性与前瞻性。

3 基于无人机技术的桥梁结构健康评估方法

3.1 损伤特征量化与参数提取

桥梁健康评估的核心在于从多源监测数据中提取具有代表性的损伤特征参数，并将其转化为可量化的指标。基于无人机采集的高清图像，通过图像分析算法提取裂缝的几何属性，包括长度、宽度、走向及分布密度，这些参数能够直观反映表面损伤的严重程度。红外热成像数据则通过温度梯度分布揭示桥梁内部的隐蔽缺陷，例如材料分层或渗水区域，其量化依赖于异常温差的阈值判定与空间分布统计。激光雷达生成的三维点云模型通过曲面拟合与曲率计算，捕捉桥梁结构的局部形变与整体刚度变化，例如桥面沉降或桥墩倾斜角度。这些参数的提取不仅需要高精度算法的支持，还需结合桥梁设计规范中的容许阈值，将物理量转化为标准化的损伤指数。通过多源数据的交叉验证，例如将热成像异常区域与三维形变数据叠加分析，可进一步排除环境干扰导致的误判，确保参数提取的可靠性与工程适用性。

3.2 损伤模式分类与优先级划分

在损伤参数提取的基础上，需通过模式识别技术对损伤类型与成因进行归因分析。基于机器学习的分类算法能够将裂缝形态、温度异常模式及形变特征映射至预定义的损伤类别，例如荷载超限导致的横向裂缝、材料疲劳引发的网状裂纹或环境腐蚀引起的锈蚀扩张。分类过程中，需结合桥梁结构力学特性与历史维护记录，引入专家知识库对算法输出进行修正，避免单纯依赖数据驱动的误分类。损伤优先级划分则需综合考虑结构安全性与经济性因素，例如位于主梁关键受力区域的裂缝或桥墩基础的不均匀沉降，因其对整体稳定性的威胁较大，需标记为高优先级修复目标。同时，损伤扩展速率的动态评估也被纳入优先级判定体系，例如短期内快速扩展的裂缝相较于稳定损伤需优先干预。这种分级策略通过量化风险等级与修复成本，为管理者提供层次化的决策依据，确保资源分配的科学与高效性。

3.3 剩余寿命预测与安全阈值判定

桥梁剩余寿命预测需构建多因素耦合的退化模型，将当前损伤状态与未来性能衰减趋势相关联。基于监测数据的时序分析，可识别损伤参数的演化规律，例如裂缝宽度随时间的线性或指数增长模式。结合环境因素（如温湿度波动、盐雾腐蚀）与运营荷载（如交通流量峰值），通过概率图模型量化不确定性对寿命预测的影响，例如蒙特卡洛模拟可生成多种可能的退化路径并计算其发生概率。安全阈值的设定则依赖于结构设计规范

与历史失效案例的统计分析，例如将主梁挠度超过设计值的 10% 或裂缝宽度突破材料耐受极限作为预警触发条件。动态阈值调整机制进一步引入实时监测数据，例如在极端天气事件后临时降低形变容许值以提升安全裕度。通过将预测结果与阈值对比，系统可实时输出桥梁的安全状态评级，为运营管理提供即时风险预警。

3.4 智能决策支持与维护策略优化

健康评估的最终目标是为桥梁维护提供可操作的决策建议。智能决策系统通过整合损伤分类、优先级排序及寿命预测结果，生成定制化的维护方案。例如，对于低风险损伤推荐采用周期性复测与表面封闭处理；中度损伤触发局部加固或材料替换计划；而高风险损伤则需启动结构整体性能评估与应急加固工程。决策过程中，系统通过多目标优化算法权衡经济成本、施工周期与风险降低效益，例如在预算约束下优先选择性价比最高的维护组合方案。此外，维护策略的动态调整机制利用历史维护效果数据反馈优化模型参数，例如通过强化学习提升对特定损伤修复效果的预测精度。

4 结语

综上所述，无人机技术凭借其独特的优势，在桥梁结构健康监测与评估领域展现出巨大的应用潜力。通过多模态数据采集、先进的数据处理与分析方法以及智能化的评估策略，实现了对桥梁结构的全面、精准、高效监测与评估。然而，尽管无人机技术在桥梁监测与评估中取得了显著进展，但仍存在一些挑战和需要进一步研究的方向。例如，如何在更复杂的环境条件下提高无人机的飞行稳定性和数据采集的准确性；如何进一步优化深度学习模型，以更好地适应桥梁损伤模式的多样性和动态变化；如何加强不同传感器数据融合的深度和精度等。未来的研究应聚焦于解决这些问题，不断完善无人机技术在桥梁结构健康监测与评估中的应用，为保障桥梁的安全运营和延长使用寿命提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 王爽. 基于无人机摄像的桥梁结构位移检测研究[D]. 重庆交通大学, 2022.
- [2] 周云, 李剑, 刘鹏等. 融合无人机线型测量与振动测试的桥梁状态评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023 (11): 14-24.
- [3] 舒抒怀, 程依婷, 胡建鑫. 基于图像技术的无人机系统在桥梁检测的应用[J]. 山西建筑, 2019 (18): 197-198.