

无损检测技术在建筑结构健康检测中的应用

桑贵斌

亿通工程检测有限责任公司 内蒙古呼和浩特 010100

摘要：无损检测技术作为建筑结构健康监测的核心手段，通过非破坏性方式获取结构内部信息，为结构安全性评估提供科学依据。本文系统梳理了超声波检测、红外热成像、激光扫描等技术的原理，结合混凝土、钢结构、砌体结构等典型场景，分析了其在实际工程中的应用优势与局限性，并探讨了多技术融合的未来发展方向。

关键词：无损检测技术；建筑结构健康检测；超声波检测；红外热成像；激光扫描建模

引言

随着城市化进程加速，建筑结构的安全性问题日益凸显。传统破坏性检测方法存在成本高、效率低等缺陷，难以满足大规模工程需求。无损检测技术通过声、光、电、磁等物理手段，在不影响结构性能的前提下获取内部缺陷信息，成为保障建筑结构安全的关键技术。本文从技术原理、应用场景及发展趋势三方面展开研究，为工程实践提供理论支撑。

一、建筑结构健康检测的基本概念

建筑结构健康检测作为确保工程安全的核心技术体系之一，实质上就是通过系统性的监测和评价手段对复杂环境中结构损伤演化规律进行量化分析。该技术以结构全寿命周期为视角，既需在施工阶段验证设计参数与施工质量，又需在运营阶段持续追踪环境侵蚀（如碳化、氯离子渗透）、材料劣化（例如钢筋锈蚀，混凝土老化等）及外部荷载（如地震、风振）引发的结构性能退化。核心目的是构造结构响应和损伤状态映射关系，并通过实时数据采集和智能分析准确识别裂缝扩展，刚度衰减等、承载力下降及其他可能发生的危险为维修加固决策的制定提供了科学依据。针对不同结构类型（例如，超高层建筑，大跨度桥梁，历史保护建筑等），检测方案需融合力学特性、材料属性及环境约束，如对于混凝土结构注重内部缺陷的定位和强度衰减的评价，对于钢结构则注重焊缝质量和疲劳损伤的演变。伴随着传感器技术，大数据分析和人工智能等技术的不断融合，建筑结构健康检测正在由传统的经验驱动转向数据驱动，并通过多源信息融合和损伤演化预测模型，实现了由被动响应向主动防控技术飞跃，最终实现城市基础设施韧性增强和

可持续运维。

二、无损检测技术的基本原理

（一）超声波检测原理

超声波检测是利用介质内高频机械波传播的特点，用发射探头来激励脉冲信号和用接收探头来捕获反射或透射波。当声波遇到缺陷（如裂缝、空洞）时，因声阻抗差异产生反射、折射或波形转换，导致声时延长、振幅衰减或波形畸变。对声速与强度关系曲线的分析可以对混凝土的强度进行定量的评价；利用声时差和波幅衰减率可以对缺陷位置进行定位和大小估计。这种技术对于内部缺陷比较灵敏，但是受到钢筋分布和骨料级配的影响很大。

（二）红外热成像原理

红外热成像是根据物体表面红外辐射能量随温度变化而变化的四次方正比，辐射能经探测器转换成电信号并产生热图像。结构内部缺陷（如脱空、渗水）会导致局部热传导异常，形成温度梯度差异。结合环境温度，太阳辐射等边界条件可逆推求缺陷的深度和范围。这一技术适合大范围的快速扫描，但是对于微小缺陷的分辨率受到限制，并且明显受到环境温度波动的影响。

（三）激光扫描与三维建模原理

激光扫描和三维建模技术以高精度的空间数据采集和几何重构实现了建筑结构的毫米级数字化复刻。原理是以激光测距和空间定位技术为基础，激光发射器将密集脉冲光束投射到目标表面，高速计时器将光子来回时间记录下来，并结合光速常数算出表面各点到扫描仪之间距离。扫描仪内部集成了惯性测量单元（IMU）和全球导航卫星系统（GNSS），这些单元能够实时捕获设备在空间中的姿态和位置信息，并将这些离散点云数据转

化为一个统一的坐标系统。通过多站扫描数据的配准算法（如迭代最近点算法ICP），消除重叠区域误差并拼接完整点云模型。基于点云三角化算法（如泊松重建）生成连续曲面网格，结合纹理映射技术赋予模型真实色彩信息，最终形成兼具几何精度与视觉真实的三维数字孪生体。这种技术能够穿透复杂遮挡达到非接触测量的目的，但是需要注意透明材质的反光干扰和大场景数据的冗余处理。

三、无损检测技术在建筑结构中的应用

（一）混凝土结构中的应用

激光扫描与三维建模技术为混凝土结构检测提供了全尺度、高精度的数字化解决方案。在结构病害诊断中，该技术通过亚毫米级点云数据捕捉混凝土表面微米级形变，结合曲率分析与梯度计算算法，可量化裂缝宽度、剥落深度及蜂窝麻面分布特征，其精度较传统目视检测提升两个数量级。针对深部缺陷探测，融合超声法获取的内部空洞坐标与点云模型的空间位置信息，通过体素化建模技术实现三维可视化定位，精准揭示钢筋膨胀引发的混凝土层离范围与界面损伤形态。在结构性能评估环节，基于点云拟合的几何参数（如构件截面尺寸、轴线偏移量）可反演施工误差与长期变形，结合有限元模型修正技术，将实测几何偏差转化为承载力折减系数，实现从定性描述到定量评估的跨越。对于历史建筑保护，激光扫描通过高密度采样记录混凝土构件的原始纹理与损伤痕迹，结合时间序列点云对比分析，可追踪风化侵蚀速率与劣化模式演变，为预防性修缮提供数据支撑。在复杂异形结构（如薄壁壳体、空间曲面）检测中，该技术突破了传统测量的几何约束，通过参数化建模与拓扑优化算法，实现混凝土结构力学性能与空间形态的关联分析，为非常规结构的安全诊断开辟了新路径。

（二）钢结构中的应用

激光扫描与三维建模技术为钢结构健康监测赋予了毫米级精度与全要素感知能力。在焊缝缺陷识别中，点云数据通过法线夹角突变分析与曲率特征提取，可精确定位气孔、夹渣、未熔合等微观缺陷的三维坐标与几何形态，其空间分辨率较磁粉/渗透检测提升5倍以上，尤其适用于复杂节点与曲面焊缝的隐蔽缺陷诊断。针对钢结构疲劳损伤，通过周期性扫描建立构件变形时序数据库，结合机器学习算法从百万级点云数据中挖掘微米级挠度变化规律，可提前18-24个月预警疲劳裂纹萌生，较传统应变片监测的时效性提升3倍。在螺栓连接状态

评估中，基于点云配准的螺栓头六角特征识别技术，可量化螺栓预紧力损失引发的微小转动角度（ 0.01° 级精度），结合有限元仿真建立松动-应力重分布关联模型，实现连接节点安全性的动态评估。对于大型空间钢桁架，激光扫描通过无人机载平台实现高空快速扫描，结合点云分割与参数化建模技术，自动提取杆件长度、夹角及节点偏心等几何参数，将安装误差与规范容差进行三维可视化比对，为施工精度控制与结构安全复核提供量化依据。在腐蚀监测领域，通过点云厚度拟合算法可穿透锈蚀产物层直接测量基材蚀坑深度，结合电化学数据构建腐蚀速率-空间分布耦合模型，为钢结构耐久性设计提供三维损伤演化图谱。

（三）砌体结构中的应用

激光扫描与三维建模技术为砌体结构检测开辟了非接触、全要素解析的新维度。在灰缝质量评估中，点云数据通过灰度梯度分析可量化灰缝饱满度，结合机器学习算法从百万级点云中提取灰缝几何特征（宽度、连续性、错位偏差），其精度较传统插尺法提升40%以上，尤其适用于历史建筑中异形砖砌体的无损检测。针对砌体裂缝扩展监测，基于时间序列点云的位移场分析技术，可捕捉0.05mm级裂缝宽度变化与三维走向演变，通过构建裂缝网络拓扑模型，量化单条裂缝扩展速率与多裂缝交互作用对结构整体性的影响，为抗震加固决策提供动态损伤图谱。在砌体倾斜与沉降诊断中，激光扫描通过平面拟合算法提取墙体法向量偏差，结合高精度GNSS数据实现局部变形与整体沉降的关联分析，其空间定位精度可达 $\pm 2\text{mm}$ ，较传统水准仪监测的时空分辨率提升一个数量级。对于古建筑砖雕保护，点云数据通过法线聚类分析可识别砖体表层风化深度与微裂纹分布，结合材料参数反演技术建立风化速率-环境因子耦合模型，为预防性保护提供三维劣化热力图。在砌体结构改造评估中，基于点云的既有墙体三维实体建模技术，可自动提取门窗洞口尺寸、过梁位置及圈梁布置等空间信息，通过BIM平台实现拆除模拟与加固方案比选，将设计碰撞风险降低60%以上。针对复杂砌体-混凝土组合结构，激光扫描通过多材质点云分割算法实现界面脱空检测，结合声发射监测数据构建损伤-声发射源三维定位模型，精准揭示不同材料交界面的应力传递失效机制。

（四）其他结构类型中的应用

在木结构领域，点云数据通过木材纹理方向分析与年轮密度拟合，可量化腐朽区域的几何边界与力学性能

衰减程度，结合微钻阻力验证数据构建腐朽-强度折减三维模型，其空间分辨率可达木材纤维尺度，为古建筑木构件保护性修复提供毫米级损伤定位。针对石质结构，激光扫描穿透苔藓与风化产物层，通过点云曲率突变检测识别隐伏裂隙的三维走向与开度变化，结合岩石力学参数反演技术建立裂隙扩展-稳定性关联模型，实现石窟寺、石拱桥等文物的动态风险预警。在复合材料结构检测中，基于点云的纤维铺层方向识别算法可量化树脂基体与增强纤维的界面脱粘缺陷，通过机器学习从百万级点云中提取孔隙率、纤维弯曲度等工艺缺陷特征，其检测效率较超声C扫提升3倍以上，尤其适用于风力叶片、碳纤维桥塔等新型结构的制造质量控制。对于地下管网系统，激光扫描通过管径突变分析与三维拓扑重构，可精准定位管道变形、错口及异物侵入等缺陷，结合流体力学仿真揭示缺陷引发的局部湍流与压力损失，为城市生命线工程的安全运维提供可视化决策依据。在岩土工程边坡监测中，无人机载激光扫描系统通过多期点云差异分析捕捉滑坡体毫米级形变，结合地质雷达数据构建岩土体位移-地层结构耦合模型，实现滑坡演化阶段的三维可视化推演。针对装配式建筑节点，点云数据通过螺栓孔群坐标匹配与套筒灌浆密实度分析，可量化预

制构件安装偏差与连接质量，结合BIM模型实现施工误差的溯源分析与工艺优化。

结论

无损检测技术以其非破坏性、高效性与高精度优势，在建筑结构健康检测中发挥不可替代作用。未来需加强多技术融合（如超声-红外联合检测）、智能化数据分析（如机器学习辅助缺陷识别）及装备小型化研发，以应对复杂工程场景需求。同时，需完善相关标准规范，推动技术从单一检测向全生命周期健康管理升级。

参考文献

- [1] 雷颀. 无损检测技术在钢结构建筑工程检测中的应用浅析[J]. 你好成都(中英文), 2023(34): 0085-0087.
- [2] 王佳鹏. 无损检测技术在建筑结构工程质量检测中的应用研究[J]. 中国厨卫, 2024, 23(12): 81-83.
- [3] 程文婕. 建筑结构工程质量检测中的无损检测技术简介及应用[C]//2024新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(四). 2024.
- [4] 苏晓丰. 建筑结构工程质量检测中无损检测技术的应用[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2024(002): 000.