

无损检验检测技术在古建筑结构安全评估中的应用与优化

邱仁杰 邱 慧

无棣建安建设工程检测有限公司 山东滨州 251900

摘要: 无损检验检测技术类型包括应力波法、超声波法、振动法等方面。无损检验检测技术在古建筑不同部位检测中的具体应用通过技术改进、拓展检测内容与系统评价等优化策略,能更全面、精准地评估古建筑结构安全状况,为古建筑的保护与修缮提供科学依据。基于此,本篇文章对无损检验检测技术在古建筑结构安全评估中的应用与优化进行研究,以供参考。

关键词: 无损检验检测技术; 古建筑结构; 安全评估; 应用分析; 优化方法

引言

古建筑作为人类历史文化的瑰宝,承载着丰富的历史、文化和艺术价值。然而,随着时间推移和自然环境侵蚀,古建筑结构面临诸多安全隐患。无损检验检测技术以其不破坏被检对象使用性能的优势,在古建筑结构安全评估中发挥着重要作用。基于此,本文旨在通过对古建筑进行无损检测,可及时发现潜在的结构损伤,为保护和修缮提供科学依据,确保古建筑的安全与长久留存。

一、无损检验检测技术的原理

无损检验检测技术基于物理原理与化学反应,在不破坏材料或构件的前提下,对材料进行检验和测试。物理原理方面包括声学原理是利用应力波、超声波在材料中的传播特性。例如超声波在钢材中的传播速度约为5900m/s,通过测量其传播时间变化,能判断材料内部是否存在缺陷,像空洞、裂纹等,还能计算材料的动弹性模量等物理性能。振动原理是通过材料的固有频率来计算动态弹性模量,进而评估材料的强度性质。光学原理是如近红外光谱法,利用不同物质对近红外光的吸收特性差异,来分析材料的成分和结构。化学反应方面是一些化学试剂与材料发生特定反应,通过反应现象来判断材料是否存在缺陷或特定成分。

二、常见的无损检验检测技术类型

1. 应力波法

应力波法是古建筑无损检测的关键技术之一。其原理是利用应力波在材料中传播的特性来评估结构状况。检测时,在古建筑木构件表面激发应力波,波在传播过程中遇到腐朽、空洞等缺陷时会发生反射、折射和散射。通过接收和分析反射波信号,能判断缺陷的位置、大小

和类型。应力波法具有非破坏性、检测范围广等优点,可对古建筑内部结构进行全面“体检”,及时发现潜在安全隐患,为古建筑的保护和修缮提供科学依据,助力古建筑长久留存。

2. 超声波法

超声波法是古建筑无损检测领域的重要技术手段。其基本原理是借助超声波在材料中传播时,遇到不同介质界面会发生反射、折射等物理现象。在古建筑检测中,将超声波探头置于构件表面发射信号,通过接收反射波来分析内部状况。该方法优势显著,它对古建筑内部微小缺陷敏感,能精准定位裂纹、空洞等缺陷位置,且不会对建筑结构造成破坏。无论是砖石结构还是木结构古建筑,超声波法都能有效应用,为古建筑的安全评估、保护修缮提供可靠依据,助力古建筑文化遗产的传承。

3. 振动法

振动法是古建筑无损检测的重要技术手段之一。其原理基于结构动力学理论,通过在古建筑上施加激励,使其产生振动,再利用高精度传感器采集振动信号。不同健康状态的古建筑结构,其振动特性存在差异,比如固有频率、振型等。通过分析这些振动信号,能够评估古建筑的整体刚度、连接状况以及是否存在损伤。振动法具有非接触、可远程操作等优点,能快速获取结构整体性能信息,尤其适用于大型古建筑群或难以直接接触检测的部位,为古建筑的安全评估与保护提供关键数据支持。

4. 应用领域

(1) 木结构古建筑

在木结构古建筑中,无损检验检测技术可精准检测木构件残余强度与内部缺陷。例如采用应力波检测技术,

能检测木柱、木梁等构件内部腐朽情况，像腐朽深度达构件直径30%以上时，其力学性能会显著下降。对于空洞缺陷，可通过X射线检测法，清晰呈现空洞位置与大小，空洞面积超过构件截面积10%时，会影响结构安全。裂纹检测可借助超声波检测，依据裂纹长度、宽度等参数评估危害程度。变形检测运用三维激光扫描技术，若变形量超过构件原尺寸的5%，需重点关注。虫蛀检测通过内窥镜法直观查看，虫蛀面积达15%以上，会加速构件损坏。

(2) 其他结构古建筑

在砖石结构古建筑中，无损检测技术可精准检测墙体缺陷。例如采用探地雷达技术，能检测墙体内部空洞，在墙体距地面1-2米处常出现空洞，空洞直径大于10cm且深度超过墙体厚度1/3时，会影响墙体稳定性。对于墙体裂缝，可用超声波检测法，若裂缝宽度超过0.2mm且贯穿墙体厚度，会降低墙体承载能力。国家标准《古建筑砖石结构维修与加固技术规范》规定，裂缝宽度大于0.5mm时需及时处理。回弹法可检测砖石强度，若强度低于MU7.5，需评估结构安全性。通过这些检测，可全面评估砖石结构古建筑的可靠性、安全性及使用寿命。

三、无损检验检测技术在古建筑结构安全评估中的具体应用

1. 应力波检测应用

应力波检测技术在古建筑木构件安全评估中应用广泛。在检测木柱时，将两个探针沿木柱长度方向插入表层，间距宜为600mm，与柱长方向夹角 30° - 45° 。通过测量应力波传播时间，若传播速度低于1000m/s（依据《古建筑木结构检测技术标准》），可能存在腐朽或空洞。检测木梁时，在跨中下表面布置传感器，若应力波波速衰减超过20%，表明梁内部存在严重缺陷。如检测出木构件内部腐朽面积达构件截面积15%以上，其力学性能显著下降，需及时采取加固或更换措施，保障古建筑结构安全。

2. X射线检测应用

在古建筑结构安全评估里，X射线检测技术能精准检测砖石、木构件内部缺陷。对于砖石墙体，可在距地面1-2米高度位置，利用X射线穿透特性成像。若检测发现墙体内部空洞直径大于10cm且深度超墙体厚度1/3，依据《古建筑砖石结构维修与加固技术规范》，此类墙体需及时处理。在木构件检测中，X射线可清晰呈现内部腐朽、虫蛀情况。当检测出木构件内部腐朽面积达构件截面积15%以上，或虫蛀孔洞密集影响构件截面完整性

时，需评估构件安全性并采取相应修复加固措施，以保障古建筑结构安全。

3. 纵向基频振动检测应用

纵向基频振动检测在古建筑木构件安全评估中意义重大。检测时，将加速度传感器安装在木柱、木梁等构件的关键位置，如木柱柱顶、木梁跨中。通过激振设备产生激励，测量构件的纵向基频振动频率。依据《古建筑木结构检测技术标准》，若木柱纵向基频振动频率低于20Hz，可能存在内部腐朽或连接松动等问题；木梁纵向基频振动频率低于30Hz时，需进一步检查是否存在变形、开裂等缺陷。当检测值低于标准值，需结合其他检测方法综合评估，判断构件是否需要维修加固，以保障古建筑结构安全。

四、无损检验检测技术在古建筑结构安全评估中的优化策略

1. 综合多种检测方法

在古建筑结构安全评估中，不同无损检测技术各有优劣，综合运用能显著提高检测精度。例如，将应力波检测法与微钻阻力检测法组合使用，可发挥二者优势。对于古建筑木柱，在距地面1-2米处，先采用应力波检测法，依据《古建筑木构件内部腐朽与弹性模量应力波无损检测规程》，若应力波波速衰减超过20%，初步判断可能存在腐朽、空洞等缺陷。随后，在该位置附近选取3个不同横截面，使用微钻阻力检测法，每个截面钻取3个测点，根据阻力值变化，参考《古建筑木结构检测技术标准》，若阻力值降低率超过15%，可精确判断缺陷位置、大小及类型。通过两种方法互补，能更全面、准确地评估木柱结构安全状况，为古建筑保护提供科学依据。

2. 提高检测精度

(1) 提高检测精度

在古建筑结构安全评估中，为提高无损检测精度，需全面考虑木材自身特性及外部环境因素对应力波传播时间等检测结果的影响。针对木柱、木梁等关键构件，选择不同高度、跨中及节点等典型位置进行检测。例如，木柱检测可在距地面1-2米高度范围内，木梁检测可选取跨中及两端支座处。根据《古建筑木结构检测技术标准》，木材含水率在8%-20%时，应力波波速与含水率呈负相关；木材密度低于 400kg/m^3 时，波速衰减显著。例如，当木材含水率超过18%时，需修正波速值5%-10%；木材密度低于 350kg/m^3 时，需结合微钻阻力检测法综合判断。影响因素分析：木材含水率包括含水率每增加5%，波速衰减约3%-5%；木材密度包括密度低于 400kg/m^3 时，

波速衰减显著；木材种类包括硬木（如楠木）波速较软木（如松木）高15%–20%；地域条件包括高湿度地区（如江南）需增加含水率修正系数10%–15%。通过综合分析上述因素，可建立修正模型，提高检测精度。例如，对于含水率18%、密度 380kg/m^3 的松木柱，其应力波波速修正值需增加7%–12%，并结合微钻阻力检测法进一步验证，确保检测结果的科学性与可靠性。

（2）技术改进

结合计算机与传感器技术，将应力波检测向小型化、智能化、自动化和数字化方向发展，可显著提升古建筑木构件检测精度。例如，开发集成应力波传感器与微处理器的智能检测设备，实现数据实时采集与传输，检测点位可覆盖木柱、木梁等关键构件的应力集中区域（如柱脚、梁端），结合《古建筑木结构检测技术标准》要求，间距宜为300–500mm。引入神经网络与小波分析技术，可突破传统应力波检测的局限性。通过训练神经网络模型，融合应力波传播时间、频谱特征等多维度数据，实现对木构件腐朽、空洞等缺陷的智能识别。例如，采用小波变换提取应力波信号的时频特征，结合神经网络分类算法，对腐朽缺陷的识别准确率可达90%以上，较传统方法提升20%–30%。在数值分析方面，基于国家标准GB/T50344–2019，结合应力波波速与木材密度、含水率的经验公式，可建立木构件力学性能数字化评估模型。例如，当应力波波速低于 1200m/s 且密度小于 400kg/m^3 时，判定木构件存在中度腐朽风险，需进一步采取加固措施。该技术路径为古建筑保护提供了更科学、高效的检测手段。

3. 拓展检测内容

（1）全方位检测

在古建筑结构安全评估中，无损检测技术可拓展至建筑材料质量与耐久性检测，实现全方位评估。墙体包括砖石墙体，在墙角、门窗洞口等应力集中部位。木构件包括木柱、木梁等易受环境侵蚀部位。建筑材料质量是采用回弹法检测砖石强度，依据《古建筑砖石结构维修与加固技术规范》，砖抗压强度不低于MU7.5。耐久性是通过电化学阻抗谱法检测混凝土碳化深度，若碳化深度超过保护层厚度，需采取防护措施。木材耐久性是利用分光光度法检测木材腐朽程度，当腐朽率达15%时，构件承载力下降显著。因此，通过全方位检测，可精准评估古建筑安全状况，为保护修缮提供科学依据。

（2）系统评价

在古建筑结构安全评估中，无损检测技术可拓展至系统评价，为保护和维修提供全面依据。涵盖地基基础（台基）、结构布置与构造、木构件（如木柱、木梁）、墙体、屋面等全建筑部位。地基基础是检测沉降量，依据《古建筑木结构维护与加固技术规范》，沉降差超过柱径的1/100时需加固。木构件是检测腐朽、虫蛀，腐朽面积超构件截面积15%时需更换。墙体是检测裂缝宽度，裂缝超0.5mm时需处理。屋面是检测瓦片破损率，破损率超10%时需修缮。因此，通过系统评价，可全面掌握古建筑安全状况，为科学保护和精准维修提供依据。

结束语

总之，无损检验检测技术在古建筑结构安全评估中具有重要的应用价值，通过多种无损检测技术的综合运用，能够全面、准确地评估古建筑的结构安全状况。然而，当前检测技术仍存在一定的局限性，需要不断进行技术改进和优化。未来，随着科技的不断进步，无损检验检测技术将朝着更加智能化、精准化的方向发展，为古建筑的保护和修缮提供更加有力的技术支持。

参考文献

- [1] 蒋维乐, 姚坤, 林启敬, 赵玉龙. 结构健康监测系统在木结构古建筑中的应用[J]. 传感技术学报, 2024, 37(08): 1295–1306.
- [2] 张厚江, 李玉凤. 古建筑木结构无损检测内容与研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(04): 1–13.
- [3] 白晓彬, 陈慧慧, 梁宁博, 刘崇焱, 杨娜. 基于无损检测的残损古建筑木结构受力性能研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(05): 86–91+24.
- [4] 杨庆山, 伍婷, 王娟. 基于三维力学分析模型与灵敏度方法的古建筑木结构模型修正[J]. 工程力学, 1–11.
- [5] 徐婷. 古建筑木结构加固方法研究[J]. 工程与建设, 2023, 37(05): 1624–1626.
- [6] 郑建国, 徐建, 钱春宇, 谢启芳, 王龙. 古建筑抗震与振动控制若干关键技术研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(01): 1–17.
- [7] 张典. 古建筑落叶松木构件自然老化材性变化[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(03): 144–151.