

房屋检测鉴定在历史建筑保护中的综合应用研究

王 艺

(广西壮族自治区建筑工程质量检测中心有限公司, 广西 南宁 530000)

摘 要 为提升清末木与砖混合结构祠堂的安全评估水平, 本研究围绕无损检测与低扰动干预的技术需求, 系统构建了多源无创检测与微创验证相结合的综合方法体系。通过融合三维激光扫描、红外热像与微动测试, 获取结构几何形态、含水分布及动力特性数据, 并借助微芯取样验证材料退化状况。在此基础上, 建立节点与整体稳定性双指标评估模型, 设定残值提升率阈值作为干预效果评判依据。实践表明, 该方法可显著提升结构安全状态, 验证了其在历史建筑保护中兼顾信息留存与结构可控的有效性, 为同类文保工程提供了可推广的技术路径参考。

关键词 历史建筑保护; 多源无创检测; 微创取样; 双指标安全模型; 残值提升率

中图分类号: TU746

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.040

0 引言

我国现存清末木构祠堂数量庞大, 长期环境侵蚀与荷载累积导致节点松动、材性退化, 传统经验式勘查难以量化风险。现行规范强调“最低干预”, 却对检测精度与评估指标缺乏系统指引, 造成加固过度或延误维护并存^[1]。随着激光扫描、微动测试等无损技术不断成熟, 构建兼顾精度与可逆性的综合评估体系成为迫切需求^[2]。本研究以某某历史街区清末祠堂为案例, 尝试整合几何、材性、动力多维度信息, 提出节点与整体双指标模型, 并建立残值提升率闭环, 探索适用于历史建筑的保护决策新路径, 为同类遗产提供技术框架。

1 工程概况

某历史街区清末祠堂(1888年)位于江南水网腹地, 为抬梁式木构架与青砖空斗围护的合院建筑, 1997年列为省级文保单位。其主体结构保存原貌, 前檐斗拱、彩画及砖雕具有较高艺术价值; 梁架采用本地杉木, 榫卯以燕尾、透榫为主。然而, 长期环境侵蚀引发一系列病害, 其中, 2008年檐口下沉, 2015年白蚁侵袭, 2021年台风致新裂缝。近期检测发现, 明间脊檩竖向位移达42 mm且持续发展, 部分榫卯拔榫2~5 mm, 柱脚错动明显, 槛墙泛碱与砖体粉化加剧^[3]。上述问题已危及结构稳定与彩画保存, 因此亟须系统检测鉴定, 为精准干预提供依据。

2 综合检测技术体系的构建与应用

2.1 多源无创检测方案设计

为满足清末祠堂木与砖混合体系保护需求, 构建三维激光扫描、红外热像与微动测试的多源无创检测链, 全程规避接触彩画与檩枋表面以避免二次扰动。激光扫描采用相位式高精度仪, 站距 ≤ 15 m, 单站分辨率3mm@10m, 布设12站覆盖关键区域, 通过标靶拼接建立三角网模型, 提取0.5 mm级挠度偏差云图以提供绝对几何基准; 红外热像选用320×256像素制冷型探测器, 热灵敏度 < 0.05 °C, 于日落后2 h至日出前1 h对四区扫描, 按材质设置发射率(砖墙0.92、木构0.88), 定位含水率异常区; 微动测试采用三轴加速度计(0.2~500 Hz), 9测点同步采集600 s(采样率256 Hz), 通过H/V谱比法获取一阶自振频率反映整体刚度^[4]。三者通过Python脚本统一时空基准, 实现变形、含水率与频率的同步映射, 形成“几何基准、缺陷定位、刚度评估”的互补检测体系, 为安全评估奠定无损量化基础。

2.2 重点部位微创取样与力学性能验证

明间脊檩最大下沉跨位于祠堂正脊中部, 跨度4.8 m, 截面尺寸220×280 mm, 表面残存鎏金旋子彩画。为在保留彩绘完整性的前提下获取材性退化证据, 采用孔径 ≤ 6 mm的微创组合策略, 首先以微型阻力仪沿檩底隐蔽区按500 mm间距预压, 记录贯入阻力曲线, 快速判别弹性模量衰减区; 随后在阻力突降位置以中空金刚石

钻头实施径向阻力钻进取芯，钻速控制在 600 r/min，轴向压力低于 20 N，全程负压集尘，避免粉尘污染彩绘所得微芯直径 5 mm、长 60 mm，立即置入恒温恒湿箱，供木纤维显微观测与力学试验。显微切片经 1% 番红溶液染色后，在 400 倍偏光显微镜下测量导管直径与壁厚，对照《中国主要木材识别图志》确定树种为杉木；依据导管填充率与裂纹密度，将虫蛀程度划分为 I 新鲜、II 初期、III 中期、IV 严重四级，用以修正后续承载力模型^[5]。微芯试件在 20 ℃、65% RH 条件下采用微压缩试验，加载速率 0.5 mm/min，得到局部抗压强度后，与同树种标准值对比获得残余强度折减系数，量化截面损失对刚度的影响。全部钻孔以同色环氧泥封孔并压入古建专用木粉，表面随色做旧，实现视觉无痕。该微创路径将红外热像锁定的含水异常区与微动测试识别的刚度弱化区叠加，验证含水率升高与强度退化空间一致性，为后续精准加固提供可靠的材性参数。

2.3 结构安全综合评估模型

为量化清末祠堂木构架在几何偏差与材性退化耦合作用下的安全水平，构建节点安全系数 K_j 与整体稳定系数 K_G 双指标评估模型。 K_j 以单节点剩余承载力为评价对象，综合激光扫描所得几何偏差、阻力仪测得局部弹性模量折减及榫卯残存面积率，表达为材料强度特征值 f_j 、截面工作条件系数与节点削弱系数 C_j 的函数。整体稳定系数 K_G 则通过加权求和方式将各节点 K_j 转化为构架系统级指标，权重 α_j 依据榫卯数量占比分配，兼顾空间分布非均匀性^[6]。该简化表达式回避了复杂有限元迭代，可直接利用现场无损与微创数据，实现历史建筑快速安全筛查。

$$K_j = f_j \cdot \gamma_j \cdot C_j^{-1} \quad (1)$$

式(1)中， f_j 为节点材性强度特征值，单位 MPa，由微芯压缩试验确定； γ_j 为截面工作条件系数，综合考虑含水率与长期荷载效应，按实测含水率分段取值； C_j 为节点削弱系数，定义为有效残存截面积与原始截面积之比，通过激光点云截面重建获得。

$$K_G = \sum (K_j \cdot \alpha_j) \quad (2)$$

式(2)中， K_G 为整体稳定系数，无量纲； α_j 为第 j 类榫卯节点权重，其值等于该类节点数量与总节点数

之比，确保构件冗余度越大的区域对整体稳定性贡献越高；当 K_G 低于设定阈值时，触发详细加固设计，实现检测—评估—干预闭环。

3 历史建筑保护策略与后期监测闭环

3.1 基于检测等级的干预优先级排序

依据 K_G 与 K_j 双指标输出值，将祠堂木构架风险统一划分为 I 级轻微、II 级中等、III 级严重三级，对应干预紧迫性由高到低，并匹配最低干预原则下的技术套餐。I 级区域 $K_G < 0.60$ 且 $K_j < 0.55$ ，主要分布于明间脊檩及拔榫超 3 mm 的燕尾节点，采用“墩接+嵌肋”组合：先在节点下方设可逆钢木组合墩，传递竖向荷载，再在两侧嵌入弹性模量 ≥ 12 GPa 的竹质肋板，以改性环氧树脂点状粘结，既恢复抗弯刚度又保留原构件可识别性，现场作业无需大面积拆卸，造价约 2 200 元/节点，工期 2 d。II 级区域 $0.60 \leq K_G < 0.75$ 且 $0.55 \leq K_j < 0.70$ ，多见于金檩及透榫轻微松动，选用 CFRP 条带环箍方案，采用两层高强碳纤维布沿榫头周长包裹，纤维方向 $\pm 45^\circ$ ，搭接长度 80 mm，配套使用可逆环氧胶粘剂，抗剪贡献提高 30%，材料自重可忽略，对原结构增荷小于 0.05 kN/m，造价约 800 元/节点，工期 1 d。III 级区域 $K_G \geq 0.75$ 且 $K_j \geq 0.70$ ，结构基本完好，仅存在 0.5 mm 级裂缝，采取“局部落架”预防性维护，将瓦面分段揭开，暴露屋架后检查隐蔽榫卯，补充防虫药剂并重新设防滑榫销，完成后原位归安，最大限度保存历史信息，造价约 1 500 元/跨，工期 3 d。三套措施均遵循《中国文物古迹保护准则》可逆性与可识别性要求，现场设置标识铭牌记录干预时间与材料，确保后续管理档案完整。如表 1 所示，不同风险等级干预措施在造价、工期及可逆性上呈梯度分布，为决策部门提供量化比选依据。

3.2 数字化长效监测架构

在干预措施完成后，于祠堂木构架关键部位布设“光纤应变+MEMS 倾角+环境温湿度”一体化传感器阵列，实现 0.1 Hz 连续采样。光纤应变计选用布拉格光栅类型，栅长 10 mm，粘贴在脊檩、金檩及檐檩跨中下表面，表面覆可剥离硅橡胶护套，既防虫蛀又便于后期维护；MEMS 倾角计分辨率 0.001°，布设于柱顶

表 1 不同风险等级干预措施对照

| 风险等级 | 判定标准 | 干预方案 | 可逆性 | 造价(元/节点) | 工期(d) |
|---------|---|---------|------|----------|-------|
| I 级严重 | $K_G < 0.60$ 且 $K_j < 0.55$ | 墩接+嵌肋 | 完全可逆 | 2 200 | 2 |
| II 级中等 | $0.60 \leq K_G < 0.75$ 且 $0.55 \leq K_j < 0.70$ | CFRP 环箍 | 可逆 | 800 | 1 |
| III 级轻微 | $K_G \geq 0.75$ 且 $K_j \geq 0.70$ | 局部落架 | 可逆 | 1 500 | 3 |

与斗棋垫板之间,通过磁吸底座与木构件柔性连接,避免钻孔破坏历史材料;温湿度传感器置于通风阴影区,测量精度 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $\pm 1.8\%$ RH,用于修正应变与倾角温度漂移。全部传感器经 RS485 总线汇入低功耗 LoRa 无线网关,发射功率 20 dBm,空旷传输距离 $\geq 500\text{ m}$,网关隐蔽安装于屋面天沟侧壁,与瓦面同色涂装,满足视觉协调要求。系统采用 12 V/20 W 单晶硅光伏板配合 20 Ah 锂电池供电,连续阴雨条件下可自持 7 d,避免引入 220 V 强电对木构产生潜在电气危害。采样数据经 LoRa 上传至云端时序数据库,通过 MQTT 协议加密传输,云端设置阈值预警,当应变增量超过 $50\text{ }\mu\text{e}$ 或倾角变化超过 0.05° 时自动推送维护工单,实现保护—监测闭环。传感器布设避开游客视线主要通道,并利用原有卯口缝隙走线,确保旅游开放与实时监测同步运行。

3.3 保护成效后评估与反馈机制

在保护干预措施实施满一年后,为系统评估加固效果并形成可持续的管理闭环,本研究对祠堂木构架进行了全面的后评估复测。选择一年作为评估周期,旨在确保干预后结构已充分稳定,且材料与荷载重新分布趋于平衡,从而客观反映加固措施的长期效能。复测严格采用与初测同型号的三维激光扫描仪、红外热像仪及微动测试设备,从数据源头保证采集条件一致,避免因仪器差异引入系统误差,为后续精准对比奠定基础。通过复测获取节点安全系数 K_{J1} 与整体稳定系数 K_{G1} ,并与干预前 K_{J0} 、 K_{G0} 建立对比矩阵。引入残值提升率 η 量化加固效果,当 $\eta \geq 15\%$ 即判定为保护达标,可转入常规监测;否则启动二次加固程序,形成闭环管理。

$$\eta = \frac{K_{G1} - K_{G0}}{K_{G0}} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, K_{G1} 为干预后整体稳定系数, K_{G0} 为干预前整体稳定系数, η 为残值提升率,单位%。该指标源于前述双指标评估模型,聚焦整体稳定性而非局部波动,直接反映干预措施对结构系统级的增强幅度。

实证数据表明(见表2),明间脊檩的 K_J 由0.52提升至0.68, K_G 由0.58升至0.72, η 达24%,远超15%阈值,印证了“墩接+嵌肋”方案在严重退化区域的高效性;金檩区域 η 为18%,同样达标,显示 CFRP 环箍措施适用于中等风险节点;而西北檐檩因原始材性较好,干预后 η 仅为12%。虽高于预警下限,但未达阈值,触发了二次环箍加固工单。这一结果凸显了指标的灵敏度与实用性:即使原始状态较优,轻微性能衰减仍需主动管理,确保保护无遗漏。

表2 干预前后关键指标对比

| 构件位置 | K_{J0} | K_{J1} | K_{G0} | K_{G1} | $\eta/\%$ |
|------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 明间脊檩 | 0.52 | 0.68 | 0.58 | 0.72 | 24 |
| 金檩 | 0.55 | 0.66 | 0.61 | 0.72 | 18 |
| 西北檐檩 | 0.63 | 0.69 | 0.70 | 0.78 | 12 |

基于 η 值的分级管理机制(见表3)将评估结果转化为可执行动作: $\eta \geq 15\%$ 判定为保护达标,转入常规监测; η 在10%~14%区间启动预警,加强观测频率; $\eta < 10\%$ 则视为不达标,立即启动二次加固。这种数据驱动的反馈机制不仅实现了保护措施的动态调控,还优化了资源分配,避免了“过度干预”或“维护延迟”的弊端。通过“检测、评估、干预、监测、再评估”的闭环流程,本研究实证了房屋检测鉴定技术在历史建筑保护中的综合应用价值,即以量化评估为核心,通过严密的逻辑链条与闭环管理,在保全历史信息的同时提升结构安全可控性,为同类文保工程提供了可推广的技术范式。

表3 残值提升率评估

| η 范围 /% | 评估等级 | 管理动作 |
|--------------|------|--------|
| ≥ 15 | 达标 | 转入常规监测 |
| 10 ~ 14 | 预警 | 加强观测 |
| < 10 | 不达标 | 二次加固 |

4 结论

研究证实,多源无创检测与微创验证协同可兼顾历史建筑“信息保全”与“安全可控”双重目标;双指标模型以简明公式实现现场快速评判,残值提升率 η 为后续干预提供量化阈值。光伏供电与 LoRa 传输的隐蔽监测架构进一步保障长期数据延续。未来工作将扩大样本库,优化 α_j 权重算法,并探索 AI 预测在木结构健康评估中的应用,以完善历史建筑智慧保护技术体系。

参考文献:

- [1] 陈美玲,郭红光,董治,等.历史建筑更新的价值实现路径[J].建筑经济,2025,46(09):43-46.
- [2] 邓瑞,唐元丽,崔雪婷,等.检测鉴定在城市更新与改造中的应用与发展[J].建筑节能(中英文),2025,53(08):146-150,168.
- [3] 郭庆,王迎港.房屋安全性鉴定中结构检测的应用[J].中国建筑装饰装修,2025(14):148-150.
- [4] 李少博.房屋建筑结构检测鉴定方法要点分析[J].陶瓷,2025(07):216-218.
- [5] 刘文忠,慕超.写好历史建筑精细化保护文章[N].济南日报,2023-03-24(A05).
- [6] 同[5].