

高精度三维重建技术在古建筑榫卯结构抗震性能分析中的应用

冉富金

深圳普达核工业数字测控有限公司 广东深圳

【摘要】高精度三维重建技术在古建筑榫卯结构抗震性能分析中展现出独特优势。通过数字化采集与精细建模，可完整还原榫卯节点几何细节与连接方式，为后续力学模拟提供高可靠性数据支撑。在地震工况下，榫卯结构的受力模式与能量耗散机制可通过虚拟仿真得到量化分析，从而揭示其抗震特征与破坏路径。该方法不仅突破了传统实验难以实现的尺寸和重复性限制，也为复杂结构的多维参数研究提供便利。研究结果表明，结合三维重建与有限元分析能够更精准地评估榫卯节点的非线性响应，提升古建筑保护与加固设计的科学性。

【关键词】三维重建；榫卯结构；抗震性能；有限元分析；古建筑保护

【收稿日期】2025 年 4 月 15 日 **【出刊日期】**2025 年 5 月 12 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.2025000176

Application of high precision 3D reconstruction technology in seismic performance analysis of ancient building tenon and mortise structure

Fujin Ran

Shenzhen Puda Nuclear Industry Digital Measurement & Control Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong

【Abstract】 High-precision 3D reconstruction technology demonstrates unique advantages in seismic performance analysis of ancient architectural mortise-and-tenon structures. Through digital acquisition and detailed modeling, it enables comprehensive restoration of geometric details and connection methods at mortise-and-tenon joints, providing highly reliable data support for subsequent mechanical simulations. Under earthquake conditions, the force modes and energy dissipation mechanisms of mortise-and-tenon structures can be quantitatively analyzed through virtual simulations, thereby revealing their seismic characteristics and failure paths. This method not only overcomes the limitations of traditional experiments in terms of scale and repeatability but also facilitates multidimensional parameter studies for complex structures. Research findings indicate that combining 3D reconstruction with finite element analysis can more accurately evaluate nonlinear responses at mortise-and-tenon joints, enhancing the scientific rigor of ancient building conservation and reinforcement design.

【Keywords】 3D reconstruction; Mortise-and-tenon structures; Seismic performance; Finite element analysis; Ancient building conservation

引言

古建筑作为历史文化的载体，其结构稳定性长期受到地震威胁。榫卯结构因独特的木构连接方式在历代建筑中广泛应用，展现出柔韧与耗能的特点。随着数字化技术的发展，高精度三维重建为研究榫卯节点提供了新的路径。该技术不仅能细致再现结构形态，还能后续抗震模拟建立可信的几何基础。通过与有限元分析结合，可深入揭示榫卯在地震作用下的受力规律与变形机理。以此为起点，古建筑抗震性能研究将获得更科学的理论依据，为遗产保护提供坚实支撑。

1 古建筑榫卯结构抗震性能研究现状与问题

古建筑中榫卯结构作为承重与连接的核心，其抗震性能长期以来是学术界和工程界关注的重点。木构建筑在历史长河中屡经地震考验，许多遗存虽历经数百年仍然屹立，但在强震环境下也表现出脆弱的一面。榫卯节点通过嵌合、摩擦与挤压传递荷载，具有一定的耗能能力和自复位特性，但在高强度地震作用下，节点的松动、开裂和滑移常导致整体结构失稳^[1]。传统研究多依赖经验判断与破坏性实验，受限于试件制作、重复性与观测手段，难以全面揭示榫卯在不同工况下的真

实动力响应特征。这种局限性使得古建筑抗震机理的认识长期停留在宏观层面,缺乏精细化的量化依据。

随着保护理念的提升,单纯依靠经验修缮已无法满足科学保护的要求。现有研究方法普遍存在结构信息采集不足、形态还原精度不高、动力学分析不完善等问题。榫卯节点多为非线性接触结构,受力过程中存在摩擦耗能、间隙闭合与局部压溃等复杂机理,传统二维测绘与简化模型难以准确模拟。尤其在地震荷载作用下,榫卯节点的滞回特性和能量耗散机制往往表现出强烈的非线性和路径依赖性,导致实验结果难以重复,数值模拟结果与实际情况之间存在偏差。这种差距不仅影响了对古建筑抗震性能的准确评估,也制约了加固措施的科学制定。

在实际保护工程中,如何在保持榫卯原真性的前提下,科学评估并提升抗震能力,成为亟待解决的核心问题。缺乏高精度的数据支撑,使得保护与修复方案往往停留在经验导向,难以量化效果。部分工程虽然尝试引入有限元分析,但由于基础几何数据不足,计算模型过于理想化,结果难以满足工程应用需求^[2]。这种现实困境凸显出研究方法升级的迫切性,亟需借助高精度三维重建等先进技术手段,为榫卯节点建立真实可靠的几何与力学模型,以突破现有瓶颈,为古建筑抗震性能研究提供更加科学和系统的支撑。

2 高精度三维重建技术在榫卯节点细节复原中的应用

高精度三维重建技术在榫卯节点细节复原中展现出极高的适用性。通过激光扫描、结构光测量和多视影像匹配等方法,可以在不接触文物本体的情况下获得节点表面的完整数据。榫头与卯眼的几何关系往往包含微小的斜面、圆角以及因年代久远产生的磨损痕迹,这些细节对力学性能有直接影响^[3]。三维重建能够以亚毫米级的精度捕捉这些复杂特征,使得榫卯节点的真实状态得以数字化保存。这种方式不仅避免了传统测绘因工具接触导致的二次破坏,也为后续力学分析和虚拟仿真提供了可靠的基础数据。

在建模过程中,三维重建技术能够清晰还原节点内部与外部的空间关系。榫头插入卯眼后的间隙、接触面分布以及局部磨损情况,都可通过点云数据和网格模型直观呈现。结合曲面重建算法与拓扑优化技术,可生成高度拟合实际的三维模型,为有限元分析提供精确的几何输入。通过这种高保真复原,研究者能够在数字环境中对榫卯节点进行切割、拼接和尺度调整,从而探讨不同连接方式和尺度参数对抗震性能的影响^[4]。这

种精细化的数字表达突破了传统二维图纸和简化模型的限制,使榫卯结构的复杂受力机理能够被更深入地揭示。

在应用层面,高精度三维重建不仅服务于科研分析,还对古建筑保护实践产生直接作用。通过建立榫卯节点的数字化档案,可以在修复工程中提供精准的参考,避免因人工测量误差导致的结构偏差。重建成果还能够与有限元数值模拟相结合,用于预测节点在地震荷载下的变形模式和失效路径,从而为抗震加固设计提供依据。三维重建生成的数字模型还具备长期保存与共享的优势,能够在不同研究机构和工程团队之间传递,为跨学科研究提供支撑。这一技术的应用使得榫卯结构的研究不仅停留在传统的经验总结层面,而是迈向科学化、可量化的精细研究阶段。

3 基于有限元分析的榫卯结构抗震性能模拟与验证

有限元分析在榫卯结构抗震性能研究中发挥着核心作用。通过建立精确的三维模型,可以对榫卯节点的几何特征和材料属性进行参数化输入,使得复杂的受力行为能够在数值环境中得到真实反映。在地震荷载模拟中,模型需要考虑木材的各向异性特征、接触界面的摩擦作用以及节点间的非线性响应,这些因素决定了榫卯结构的耗能能力与破坏模式^[5]。有限元计算能够在不同地震强度和频率条件下追踪榫卯节点的位移、应力与应变分布,从而揭示其在地震作用下的滞回特性与能量耗散规律。

在模拟过程中,榫卯节点的间隙闭合、摩擦滑移以及局部压溃等现象常常表现出高度非线性。通过非线性有限元方法以及显式动力学求解,可以更好地捕捉这些细节过程。为了提升计算的准确性,通常需要对榫卯接触区域进行网格加密,以提高对接触力学行为的刻画精度^[6]。引入本构关系模型描述木材在循环荷载下的应力—应变特征,能够进一步反映榫卯节点在地震反复作用中的退化机制。通过这些方法,有限元分析不仅能够预测榫卯结构的破坏模式,还能够量化其在不同荷载水平下的安全储备。

数值模拟的结果需要与实验数据进行对比验证,以确保其可靠性。通过对比虚拟仿真与物理实验中的滞回曲线、残余变形和破坏形态,可以评估有限元模型的适用性和精度。当数值结果与实验表现一致时,有限元分析便能够作为预测工具应用于大规模古建筑结构的抗震评估中。在实际工程中,这种方法能够为加固设计提供科学依据,使得修复方案具备可量化的参考价

值。通过不断优化建模策略与验证流程,有限元分析逐渐成为榫卯结构抗震性能研究的重要途径,为古建筑保护和地震安全性评估奠定坚实基础。

4 三维重建与数值分析结合对古建筑保护的价值

三维重建与数值分析的结合为古建筑榫卯结构的保护提供了全新的研究路径。在榫卯节点的复杂力学行为中,几何形态的微小差异往往会引发受力分布的显著变化。通过高精度三维重建技术,可以完整记录榫头与卯眼的空间关系、接触界面状态以及因长期使用产生的形变与磨损痕迹。这些信息经过数字化处理后,能够直接输入数值模型,使有限元分析具备高度贴近实物的几何基础。在此基础上,数值模拟不仅可以再现榫卯结构在静载与动载下的真实受力模式,还能通过参数化研究探索不同结构形态对抗震性能的影响^[7]。这种技术路线为古建筑保护提供了突破传统经验的精确工具,使得研究成果能够更加科学地指导修复与加固工程。

在古建筑保护实践中,单纯的三维重建虽然能够实现形态保存与结构档案的建立,但其价值往往局限于几何层面。而当数值分析介入时,数字模型便具备了动力学响应模拟的能力,可以揭示榫卯节点在地震作用下的滞回曲线、能量耗散规律与破坏演化路径。通过虚拟仿真,可以在无需对真实建筑进行破坏性试验的情况下,预测不同强度地震下榫卯结构的失效模式。更为重要的是,基于重建数据生成的数值模型能够对局部节点进行修复措施的模拟测试,例如增加约束、材料替换或节点加固等方案,从而在虚拟环境中提前比较其抗震效果。这种方式不仅避免了实际工程中可能带来的风险与不确定性,也为决策提供了科学量化的依据。三维重建与数值分析的结合真正实现了从“看得见”到“算得出”的跨越,使保护措施更具针对性和可验证性。

在学术研究与工程应用双重推动下,这种结合模式已经展现出广泛的价值。对于研究者而言,三维重建提供的高保真模型使榫卯结构力学特性研究摆脱了传统简化假设的束缚,能够在多维度上展开参数分析,提升研究深度与精度。对于工程实践而言,数值分析结果可以作为修复与加固方案的直接参考,使保护过程从经验导向转向数据驱动^[8]。在大规模遗产保护中,三维重建生成的数字档案还可与数值模拟成果相结合,形成动态数据库,实现长期监测与跨项目共享。这种方法

不仅提升了古建筑抗震性能研究的科学化水平,也为文化遗产的可持续保护奠定了技术基础。随着相关技术的不断发展,三维重建与数值分析的融合将持续深化,为榫卯结构的抗震研究提供更坚实的工具体系,为古建筑的安全与长久传承贡献重要力量。

5 结语

高精度三维重建与有限元分析的结合,使古建筑榫卯结构的抗震性能研究实现了由经验认知向科学量化的转变。榫卯节点的几何特征、受力规律以及破坏模式能够在数字环境中得到真实再现,避免了传统方法的局限性。数值模拟的结果为抗震性能评估和加固措施设计提供了可量化依据,使保护工作更加精准可靠。这一研究路径不仅强化了古建筑抗震机理的理解,也为文化遗产的安全保存提供了坚实支撑。

参考文献

- [1] 周上善,蒋文波. 深度学习在基于激光条纹的线结构光点云三维重建中的应用[J/OL].激光与光电子学进展,1-35[2025-08-18].
- [2] 臧凡,孙亚琪,李泽文,等. 抗震支吊架抗震性能模拟地震振动台试验方法的研究[J].防灾减灾学报,2025,41(03): 31-36.
- [3] 王心宇,解琳琳,王涛. 采用受拉可控隔震支座的高层隔震结构抗震性能研究[J/OL].工程力学,1-9[2025-08-18].
- [4] 孙正,艾景赛,丁港澳. 多光谱光声层析成像三维重建深度学习框架[J/OL].光学学报,1-32[2025-08-18].
- [5] 胡蜜蜜,陈硕,郑嘉成,等. 基于三维重建的甘蔗幼苗生长表型特征提取方法[J/OL].农机化研究,1-8[2025-08-18].
- [6] 赵天孜,何颖. 传统榫卯结构的现代转译:家具设计中的功能创新与生产挑战[J].玩具世界,2025,(04):132-134.
- [7] 高雨沁,张祥泉. 榫卯结构在现代家居产品设计中的应用策略研究[J].美与时代(上),2025,(03):131-135.
- [8] 陈依苇,田思雨,胡昌格. 榫卯结构在工业设计领域的创新应用研究[J].模具制造,2025,25(02):223-225.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS