

古建筑木结构整体力学性能分析和安全性评价

周 康

保定市城乡建筑设计研究院 河北 保定 071000

摘要：古建筑木结构作为文化遗产载体，其力学性能分析是保障结构安全与耐久性的核心。本文从静力、动力、疲劳性能三维度解析其力学特性，提出基于目测检查、仪器检测与有限元模拟的协同评价方法。通过多尺度建模与损伤识别技术，揭示木结构在长期荷载下的应力分布规律及潜在失效模式，为差异化保护策略提供依据。研究强调综合评价法在量化损伤程度与预测剩余寿命中的优势，为古建筑木结构科学保护与可持续利用提供技术支撑。

关键词：古建筑木结构；力学性能分析；安全性综合评价

引言

古建筑木结构承载着人类文明的物质记忆，其力学性能的退化与结构失稳是文化遗产保护面临的核心挑战。受环境侵蚀、荷载累积及材料老化等多因素耦合影响，木结构易出现局部失稳、整体刚度退化等问题。传统经验修缮粗放低效，难解古建木结构力学退化隐忧。本文深探静力变形阈值、动力抗灾效能及疲劳累积损伤机制，融多技术溯源受力本征规律，为精准保护与动态修缮提供全链式技术范式。

1 古建筑木结构整体力学性能的重要性

古建筑木结构作为人类历史文化遗产的瑰宝，其整体力学性能的分析与评价对于保护这一不可再生资源具有重要意义。古建筑木结构历经风雨沧桑，承受着自然与人为环境的双重考验，其力学性能直接关系到结构的稳定性与耐久性。深入探究古建筑木结构的力学性能，有助于揭示其构造智慧与工程技艺，更为现代木结构工程的设计与实践提供了宝贵的参考与启示。古建筑木结构整体力学性能的重要性体现在多个方面。首先，它关乎古建筑的安全稳定。木结构在长期使用过程中，易受环境侵蚀、荷载变化等因素影响，导致材料老化、构件变形甚至结构失效。通过力学性能分析，可准确评估木结构的承载能力与稳定性，为制定科学的保护与维修策略提供依据。其次，力学性能分析有助于优化古建筑的保护措施。针对不同类型、不同状态的古建筑木结构，采用差异化的保护技术与方法，需建立在对其力学性能深刻理解的基础之上。通过细致入微的力学分析，可精确识别结构中的薄弱环节与潜在风险点，采取针对性的加固与修复措施，提高保护效率与效果，古建筑木结构力学性能的研究对于推动木结构工程技术的创新发展亦具有深远影响。借鉴古建筑木结构的构造理念与受力机制，可启发现代木结构工程师在材料选用、结构设计、

施工工艺等方面进行创新探索，促进木结构工程技术的持续进步与广泛应用。

2 古建筑木结构的力学性能分析

2.1 静力性能分析

在古建筑木结构的力学性能研究中，静力性能分析占据着基础性地位。这一分析旨在探究结构在静力荷载作用下的力学表现，其核心在于对结构变形、应力分布以及承载能力等关键指标精准把握。建立模型是静力性能分析的关键步骤。有限元模型的构建依托于先进的数值模拟技术，通过将木结构离散为众多微小单元，依据木材的力学特性和结构的实际构造设定参数，以此模拟结构在静力荷载下的力学响应。在构建过程中，需精确考量木材的弹性模量、泊松比等参数，以及各构件间的连接方式。物理模型则是依据相似性原理，按照一定比例缩小实际结构制作而成，能直观呈现结构在荷载作用下的变形和破坏模式。针对结构变形，需关注整体的竖向和水平位移。竖向位移过大会导致建筑的倾斜，影响使用安全；水平位移则反映结构在侧向荷载下的稳定性。应力分布分析能明确结构内部的受力状态，找出应力集中区域，这些区域是结构最易出现损坏的部位。而承载能力的评估，关乎结构能否承受设计荷载以及可能的超载情况，是衡量结构安全性的重要指标。通过静力性能分析所获取的数据，能为古建筑木结构的安全性和稳定性判断提供有力依据，助力后续的保护与修缮决策^[1]。

2.2 动力性能分析

在动力性能分析中，（1）动力有限元模型的构建是基础，它需精准捕捉古建筑木结构的几何特征、材料属性及连接方式，同时充分考虑动力荷载的频谱特性和脉动特性，以确保分析结果的准确性。（2）时程分析法在古建筑木结构动力性能分析中占据核心地位。它以输入实际地震波或模拟风荷载时程为基础，对结构展开逐

时的动力响应计算。在计算过程中,能直观且精准地呈现出结构在动力荷载影响下,加速度、位移和速度随时间的变化历程。借助这些详实的数据,能清晰了解结构在地震或风荷载作用下的具体响应。通过对这些响应的分析,可为古建筑木结构抗震和抗风性能的评估提供坚实依据,为制定有效的保护和加固措施提供有力支撑。

(3) 振型分解反应谱法则基于结构的固有振型特性,结合反应谱理论,快速高效地计算结构在不同振型下的响应,并通过合理组合得出结构总响应,为动力性能评估提供高效途径。通过这些方法,可全面获取古建筑木结构在动力荷载下的加速度、位移及速度等关键响应数据,深入分析其抗震抗风性能,为制定科学合理的保护措施提供坚实依据,确保古建筑在动态环境中的安全稳定^[2]。

2.3 疲劳性能分析

古建筑木结构历经漫长岁月,长期承受各种荷载作用,疲劳损伤和累积损伤问题不可忽视,而疲劳性能分析正是评估其长期耐久性和安全性的关键环节。疲劳试验是直接获取木结构疲劳性能数据的重要手段。在试验中,模拟实际的荷载工况,对试件施加周期性的荷载,通过监测试件在加载过程中的变形、裂纹发展等情况,获取疲劳寿命、疲劳极限等关键参数。在试验过程中,需严格控制加载频率、荷载幅值等试验条件,使其尽可能接近实际情况。有限元模拟则借助计算机技术,对木结构的疲劳过程进行数值模拟。通过建立精确的有限元模型,考虑材料的疲劳损伤本构关系,模拟结构在长期荷载作用下的疲劳损伤发展过程。在模拟中,分析不同部位的疲劳损伤程度,预测结构可能出现疲劳破坏的位置和时间。通过疲劳性能分析,能深入了解古建筑木结构在长期受力下的内部损伤演化规律。这有助于评估结构的剩余使用寿命,及时发现潜在的安全隐患。若分析结果显示结构的疲劳损伤较为严重,可提前制定针对性的保护和修复方案,如更换关键的疲劳受损构件、优化结构受力体系等,有效保障古建筑木结构的安全性和耐久性,使其能够长久保存。

3 古建筑木结构的安全性评价方法

3.1 目测检查法

(1) 该方法主要依赖专业人员凭借视觉对木结构进行全面且细致的检查。检查时,专业人员需近距离仔查看木结构的各个构件,从承担主要竖向荷载的柱,到传递水平力的梁、枋,再到具有独特力学性能和装饰作用的斗拱以及作为关键连接部位的榫卯等,都要进行无遗漏的观察。在此过程中,许多明显的损伤和缺陷能够被快速发现。木材腐朽时,其颜色会发生改变,质地也

会变软,严重情况下还会出现空洞;虫蛀现象则表现为木材表面存在虫孔,周围有木屑堆积;而开裂问题可直接看到裂缝的大小、走向以及分布情况。(2) 不过,目测检查法存在不可忽视的局限性。一方面,它仅能发现木结构表面的损伤和缺陷,对于内部问题难以察觉。由于长期受潮或应力集中等因素,内部木材出现腐朽或损伤,但从外观难以直接判断。另一方面,该方法无法对结构性能变化进行量化分析,不能准确确定损伤对结构整体力学性能的具体影响程度。(3) 尽管存在局限,目测检查法在古建筑木结构安全性评价流程中仍占据不可或缺的地位。它能为后续更深入的检测提供重要线索,帮助检测人员快速锁定重点检测区域,更有针对性地运用其他检测方法,提高检测效率和准确性,为全面评估古建筑木结构安全性奠定基础^[3]。

3.2 仪器检测法

仪器检测法借助各类专业检测仪器,对古建筑木结构展开精准的检测与深入的分析,为安全性评价提供关键的数据支撑。在众多检测仪器中,超声波检测仪利用超声波在不同介质中的传播特性,当超声波遇到木材内部的缺陷,如空洞、腐朽区域时,其传播速度、能量衰减等参数会发生变化,通过对这些变化的分析,能够确定缺陷的位置、大小和形状。电阻应变仪则用于测量木结构在受力状态下的应变情况,通过在构件表面粘贴应变片,将构件的应变转化为电信号,获取结构的应力分布信息,判断结构的受力是否处于正常范围。裂缝测宽仪可精确测量木结构表面裂缝的宽度,对于评估裂缝对结构性能的影响具有重要意义。在实际应用时,操作人员需依据不同的检测目的和检测对象,合理选择相应的仪器,并严格按照操作规程进行检测。对于大型木结构建筑,可采用超声波检测仪对关键承重柱进行内部缺陷检测;在监测结构受荷载作用时的应力变化时,电阻应变仪便能发挥重要作用;而对于已出现裂缝的部位,裂缝测宽仪能及时准确地监测裂缝的发展情况。

3.3 有限元模拟法

(1) 其依托功能强大的有限元分析软件,构建高度精确的模型是基础环节。在建模时,必须全面且细致地考虑木结构的各个方面,其中几何形状的精确还原是重要前提,它直接影响后续力学分析的准确性;材料特性的合理设定也至关重要,像木材的弹性模量、泊松比等力学参数,需严格依据实际检测数据或者相关规范来确定。对于榫卯连接这一古建筑木结构的独特构造,要采用专门适配的接触模型,以此精准模拟其特殊的力学性能,包括连接的刚度以及耗能能力等。(2) 完成模型

构建后,便进入模拟加载阶段。在此过程中,根据实际需求对结构施加不同类型的荷载。施加静力荷载,如模拟结构自重、楼面荷载等,通过分析结构在这些荷载作用下的变形情况、应力分布状态以及承载能力,能初步了解结构的静力性能;也可以施加动力荷载,如模拟地震、风荷载等,研究结构在动态荷载作用下的加速度、位移和速度响应,获取结构在不同受力状况下的力学行为数据。(3)有限元模拟法具备诸多显著优势。一方面,它能高效地针对不同工况进行模拟分析,节省了时间和成本,可快速得出结构的力学响应结果。另一方面,模拟结果的准确性较高,通过将模拟数据与实际试验数据进行对比验证,能优化模型,提高模拟的精度。且该方法还具有良好的可重复性,能方便地对不同设计参数或损伤情况进行模拟,深入分析其对结构安全性的影响,为古建筑木结构的保护和修缮工作提供科学、可靠的依据,助力古建筑保护工作的有效开展^[4]。

3.4 综合评价法

综合评价法是全面剖析古建筑木结构安全性与稳定性的有效手段,其核心在于有机融合目测检查法、仪器检测法和有限元模拟法各自的优势,克服单一方法的局限性,实现对结构的深度评估。在实际操作中,这三种方法相互配合、层层递进。目测检查法虽无法深入检测结构内部状况,但它能快速发现木结构表面的明显损伤,如构件的腐朽、开裂以及连接部位的松动等。这些表面信息为后续检测指明方向,确定需要重点关注的区域。若在目测时发现某根柱子表面有裂缝,后续的仪器检测和有限元模拟就可着重针对该柱子进行。仪器检测法借助专业设备,对结构关键部位进行精确测量,获取物理力学参数和损伤定量数据。像超声波检测仪能探测木材内部的缺陷,电阻应变仪可测量构件的应力分布,这些数据为评估结构性能提供了量化依据。通过仪器检

测,能够准确掌握结构的实际工作状态,发现潜在的安全隐患,补充和细化目测检查的结果。有限元模拟法则基于前两种方法获取的数据构建模型,模拟结构在多种荷载工况下的力学响应。它分析结构在不同荷载作用下的变形、应力分布以及承载能力,预测结构的破坏模式。通过模拟地震或风荷载作用,评估结构的抗震、抗风性能。有限元模拟能够对结构的安全性进行全面、系统的分析,为制定科学合理的保护和修缮方案提供有力支持。综合评价法将这三种方法结合起来,从不同角度、不同层次对古建筑木结构进行评估,确保不遗漏任何重要信息,从而得出更客观、准确的评价结果,为古建筑的保护和修复提供可靠依据,使古建筑能够长久保存其历史文化价值。

结束语

古建筑木结构力学性能的系统性研究,实现了从定性描述到定量分析的跨越。通过静力性能分析明确结构承载阈值,动力性能分析揭示抗震抗风薄弱环节,疲劳性能分析预判长期耐久性风险,构建了全生命周期力学性能评估体系。综合评价法闭环联动观测与力学响应,赋能保护决策精准化。后续当深挖多场耦合退化机理,联姻智能监测动态评估,双轨驱动古建与现代木构技术跃迁。

参考文献

- [1]潘毅,安仁兵,游文龙.古建筑木结构榫卯节点力学性能研究进展[J].建筑结构学报,2024,45(7):226-241.
- [2]李钊,王志涛,郭小东.残损古建筑木结构力学性能相关研究进展与展望[J].林产工业,2022,59(12):39-46.
- [3]王晓奇,郭小东,王志涛.基于模糊层次分析法的木结构古建筑安全评价[J].安全,2021,42(2):31-37.
- [4]陈佑豪.砖木结构低矮古建筑抗风安全性鉴定分析[J].住宅科技,2020,40(2):55-58.